



FACULTAD DE INGENIERÍAS

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN ASTROINGENIERÍA ALFA ORIÓN

TRABAJO DE GRADO:

**DESARROLLO DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO
PARA EL MONITOREO DE LAS
RADIOEMISIONES SOLARES Y JOVIANAS EN
20,1 MHZ**

Un trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el
título de Ingeniero Físico de la Universidad Tecnológica de Pereira

Presentado por:

Hamilton David Galvis Rodriguez

Asesorado por:

Msc. Edwin Andrés Quintero

*Dedicado a
Mi Madre, por ser mi fuerza y mi aliento...Mi todo.*

Agradecimientos

Primero, deseo extender un agradecimiento especial a mi director de tesis Msc. Edwin Andrés Quintero por su apoyo y orientación durante todo mi proceso de formación académica y personal, sus conocimientos y experiencia como investigador han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto. En segunda medida, quiero agradecer a la Universidad Tecnológica de Pereira y a su programa de Ingeniería Física por aceptarme en la carrera y brindarme una excelente educación, con ilustres docentes que aportaron de manera significativa a mi formación profesional. En tercera instancia, quiero agradecer al Grupo de Investigación en Astroingeniería Alfa Orión por nutrir y potencializar mis habilidades y por brindarme las herramientas e infraestructura necesarias para ejecutar mi proyecto.

También quiero agradecer a todas y cada una de las personas que desde su quehacer contribuyeron en gran medida al desarrollo del proyecto: Al profesional investigador Jairo A. Aguirre por su disposición al realizar la primera lectura de la tesis y por sus consejos prácticos de forma y estilo, a la Msc. Leidy E. Pamplona por su tiempo y conocimientos para realizar las pruebas de laboratorio relacionadas con la antena, a mis amigos y compañeros del Observatorio Astronómico por su apoyo, consejos y el ameno espacio de estudio y trabajo que con ellos se generó. Y a mi novia Laura Barragán porque estuvo conmigo durante la mayor parte de mi tiempo en la universidad siendo mi compañía en los buenos momentos y mi apoyo en los momentos difíciles.

Por último y más importante, quiero agradecer profundamente a mi madre Ana Rodríguez por su apoyo, cariño y acompañamiento incondicional, pues en este tiempo ha inculcado en mí el sentido de la seriedad, la responsabilidad y amor por lo que hago, me incentivó y aconsejó y gracias a ella todo esto fue posible, a ella dedico este trabajo pues ella fue la energía que me impulsó a pesar de todas las dificultades.

Resumen

El estudio de los fenómenos de radiofrecuencia (RF) generados por la actividad solar y joviana es muy importante para la comunidad científica, debido a que las emisiones que se generan por dicha actividad tienen consecuencias en la cotidianidad del ser humano. En ocasiones dichas consecuencias son bastantes graves en todo lo que compete con sistemas de instrumentación electrónica o de comunicación. Gracias a la ejecución de este proyecto, se realizó el diseño y la construcción de un sistema electrónico que permitió monitorear las emisiones de radiofrecuencia provenientes del Sol y del planeta Júpiter. Se construyó, implementó y ajustó cada uno de los tres componentes fundamentales de un radiotelescopio sintonizado en 20,1 MHz, es decir, una antena que cuenta con las características electromagnéticas indicadas para esa frecuencia, un receptor con las propiedades de filtrado, mezclado y amplificación de señal correctas y un software que brinde una interfaz cómoda para trabajar con las señales adquiridas. Finalmente, mediante un proceso de recepción, acondicionamiento y procesamiento de señal, se pudo registrar mediante el software Radio SkyPipe, las variaciones en potencia de las radioemisiones jovianas y solares, con lo cual fue posible crear una base de datos de los registros medidos en el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira (OAUTP). En esta base de datos se encuentran cada uno de los 14 registros de la actividad del Sol y de Júpiter que son presentados como evidencia en la sección de resultados, con lo cual se valida el óptimo funcionamiento del radiotelescopio desarrollado.

Introducción

El Sol, como cuerpo central del sistema solar y estrella más cercana a la Tierra, es el objeto celeste que mayor influencia tiene sobre los humanos y su estilo de vida en diferentes ámbitos, por lo cual el estudio de los fenómenos físicos que se presentan en él y cómo estos afectan a la Tierra, es de suma importancia para la comunidad científica. Las manchas solares, las llamadas solares, las eyecciones de masa coronaria (EMC), el viento solar y el campo magnético del Sol, son fenómenos que ligados a la alta actividad energética del astro, representan en determinadas circunstancias, fenómenos que alteran características de la vida cotidiana en cuanto a salud y telecomunicaciones se refiere. Actualmente se sabe que el campo magnético solar afecta la tecnología y la electricidad, pues su actividad puede dificultar la comunicación entre los satélites geoestacionarios y la Tierra, tal como lo afirma el Dr. Alejandro Lara Sanchez, investigador del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), quien comenta que el estudio de los fenómenos solares es prioritario para los gobiernos y entidades militares dado que perder la comunicación por minutos podría tener consecuencias fatales¹. El campo magnético solar puede generar corrientes eléctricas variables en conductores muy grandes, por ejemplo líneas de alta tensión que suministren energía a ciudades o estados que podrían averiar los transformadores eléctricos ocasionando apagones. Las EMC pueden alterar la órbita de los satélites modificando su posición, lo que ocasiona gastos en reajustes de órbita y deterioro de los equipos electrónicos. Entre otros de los problemas que puede generar la actividad solar se tienen las declaraciones del Ph.D. Julian M. McDean y del Ph.D. Assis Muller, científicos de la NASA, quienes afirman que las tormentas solares afectan la vida en la superficie terrestre, generando problemas en los servicios de voz, datos y video, peligro para astronautas o equipo aeroespacial, interrupción del servicio GPS, problemas con radares, interrupción de señales de radio, dificultades en la televisión por satélite y problemas con la telefonía celular².

¹Fuente: http://www.geofisica.unam.mx/ciencias_espaciales

²Fuente: http://sp.ria.ru/science_technology_space/20110218/148393097.html

Por otro lado, aunque a los seres humanos los protege la atmósfera y el campo magnético de la Tierra de partículas y emisiones como rayos X, rayos Gamma y radiación infrarroja, las emisiones del espectro visible y las ondas de radio logran llegar a la superficie terrestre y generar efectos no deseados. Júpiter, es un cuerpo celeste con la capacidad de generar estas ondas de radio, por lo cual su observación y estudio adopta igual relevancia que el del Sol. Este planeta posee un campo magnético semejante al de la Tierra, lo que lo convierte en un objeto de interés desde la perspectiva de la dinámica planetaria de planetas gigantes gaseosos en otros sistemas y también desde la perspectiva de la determinación y predicción de radio ondas, al desarrollar modelos que revelen indicios sobre la dinámica e influencia sobre los planetas vecinos.

Las emisiones Jovianas, detectadas por primera vez en 1955, son dirigidas hacia la Tierra por fuentes de radio ondas localizadas cerca de los polos magnéticos de Júpiter, estas fuentes son naturales y están formadas por gases ionizados (plasma) y campos magnéticos. Las corrientes de plasma magnetizado de alta velocidad fluyen hacia las regiones polares del planeta y emiten ondas de radio en un proceso conocido como mecanismo ciclotrón máser, que cuando está operando puede opacar incluso al Sol como fuente de radio, pues puede generar fuerzas magnéticas que llevan alrededor de 40 billones de Watts de energía a las regiones polares del planeta, más que suficiente como para alimentar las tormentas jovianas en radio ondas³.

Todo esto, evidencia que el estudio del Sol y del planeta Júpiter es importante para la comunidad científica. El seguimiento y caracterización de los fenómenos solares y jovianos podrían permitir el establecimiento de parámetros que pronostiquen la aparición de futuras emisiones electromagnéticas de alta energía en ambos astros, lo cual directamente significa que se podrían prevenir daños sobre los sistemas electrónicos, si se logran predecir dichas emisiones a tiempo.

³Fuente: http://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2004/20feb_radiostorms/

Contenido

1	Preliminares	1
1.1	Planteamiento del problema de investigación	1
1.2	Objetivos	1
1.2.1	General	1
1.2.2	Específicos	1
1.3	Antecedentes	2
2	Radioastronomía	11
2.1	Radiotelescopios	15
2.2	Teoría de Antenas	17
2.2.1	Antena dipolo	17
2.2.2	Antena magnética circular isoloop	19
2.3	Radiofuentes	21
2.3.1	Sol	22
2.3.2	Júpiter	30
2.3.3	Núcleos activos de galaxias y estrellas de neutrones	37
3	Desarrollo del Sistema	43
3.1	La antena	44
3.1.1	Construcción y puesta a punto	44
3.1.2	Simulación y análisis	46
3.1.3	Pruebas experimentales	48
3.1.4	Temperatura de la antena	51
3.2	El receptor	52
3.2.1	Calibración y ajuste	55
3.3	El software	56

3.3.1	Radio SkyPipe	56
3.3.2	Radio Jupiter Pro	60
4	Resultados	63
4.1	Detecciones solares	63
4.2	Detecciones jovianas	79
5	Conclusiones	89
A	Apéndice	97
A.1	Intervalos angulares para las radio fuentes A, B, C, Io-A, Io-B e Io-C	97
A.2	Clasificación de las explosiones de radio solares	98

Listado de figuras

2.1	Espectro electromagnético	12
2.2	Primeras antenas para radioastronomía	13
2.3	Ventanas espaciales	14
2.4	Diagrama de bloques básico de un radiotelescopio	15
2.5	Radioimagen de la Vía Láctea	16
2.6	Esquema circuital equivalente de la antena isoloop diseñada	20
2.7	Llamarada solar	24
2.8	Mancha Solar	25
2.9	Eyección de masa coronaria	27
2.10	Corona solar y evidencia del viento solar	29
2.11	Comportamiento de las frecuencias emitidas en función del tiempo para rafagas L y S	31
2.12	Geometría del sistema Io-Júpiter y el cono de emisión hacia la Tierra	33
2.13	Campo magnético joviano y el toro de Io	35
2.14	Galaxia con núcleo activo M87	38
2.15	Esquema Geométrico de un Pulsar	40
3.1	Diagrama de bloques del radiotelescopio desarrollado	43
3.2	Aspecto final de la antena construida en el proyecto.	45
3.3	Curva de eficiencia y ancho de banda de la antena Isoloop.	46
3.4	Patrones de radiación en 2D para la antena isoloop.	47
3.5	Patrón de radiación tridimensional para la antena isoloop.	47
3.6	Parámetros de diseño y respuesta electromagnética de la antena isoloop.	48
3.7	Montaje experimental realizado en el laboratorio.	49
3.8	Patrones de radiación de la antena desarrollada medidos experimentalmente.	50
3.9	Respuesta en frecuencia obtenida en el laboratorio.	51

3.10	Aspecto final del receptor construido en el proyecto.	53
3.11	Diagrama de bloques del Radio Jove	54
3.12	Calibración y ajuste del receptor.	55
3.13	Software Radio SkyPipe	56
3.14	Barra de Herramientas Radio SkyPipe	58
3.15	Barra de Tareas Radio SkyPipe	59
3.16	Software Radio Jupiter Pro	61
4.1	Piso de ruido del sistema	64
4.2	Detección solar 1 registrada por el Radio Jove	66
4.3	Detección solar 1 registrada por el GOES	66
4.4	Tabla de registro del evento 1 por el SWPC	67
4.5	Detección solar 2 registrada por el Radio Jove	68
4.6	Detección solar 2 registrada por el GOES	68
4.7	Tabla de registro del evento 2 por el SWPC	69
4.8	Detección solar 3 registrada por el Radio Jove	69
4.9	Detección solar 3 registrada por el GOES	70
4.10	Tabla de registro del evento 3 por el SWPC	70
4.11	Detección solar 4 registrada por el Radio Jove	71
4.12	Detección solar 4 registrada por el GOES	71
4.13	Tabla de registro del evento 4 por el SWPC	72
4.14	Detección solar 5 registrada por el Radio Jove	72
4.15	Detección solar 5 registrada por el GOES	73
4.16	Tabla de registro del evento 5 por el SWPC	73
4.17	Detección solar 6 registrada por el Radio Jove (15:00-16:30 UTC)	74
4.18	Detección solar 6 registrada por el GOES (15:00-16:30 UTC)	74
4.19	Detección solar 6 registrada por el Radio Jove (17:30-18:00 UTC)	75
4.20	Detección solar 6 registrada por el GOES (17:30-18:00 UTC)	75
4.21	Tabla de registro del evento 6 por el SWPC	76
4.22	Detección solar 7 registrada por el Radio Jove	76
4.23	Detección solar 7 registrada por el GOES	77
4.24	Tabla de registro del evento 7 por el SWPC	77
4.25	Detección solar 8 registrada por el Radio Jove	78
4.26	Detección solar 8 registrada por el GOES	78
4.27	Tabla de registro del evento 8 por el SWPC	79

4.28 Detección joviana 1 registrada por el radiotelescopio	80
4.29 Ventana de predicción de Radio Jupiter Pro para el evento joviano 1	81
4.30 Detección joviana 2 registrada por el radiotelescopio	81
4.31 Ventana de predicción de Radio Jupiter Pro para el evento joviano 2	82
4.32 Detección joviana 3 registrada por el radiotelescopio	82
4.33 Ventana de predicción de Radio Jupiter Pro para el evento joviano 3	83
4.34 Detección joviana 4 registrada por el radiotelescopio (00:12-00:25 UTC) . . .	84
4.35 Detección joviana 4 registrada por el radiotelescopio (02:24-02:43 UTC) . . .	84
4.36 Ventana de predicción de Radio Jupiter Pro para el evento joviano 4	85
4.37 Detección joviana 5 registrada por el radiotelescopio	85
4.38 Ventana de predicción de Radio Jupiter Pro para el evento joviano 5	86
4.39 Detección joviana 6 registrada por el radiotelescopio	86
4.40 Ventana de predicción de Radio Jupiter Pro para el evento joviano 6	87

Capítulo 1

Preliminares

1.1 Planteamiento del problema de investigación

Teniendo como marco de referencia la justificación y permitinencia de la implementación expuesta en los antecedentes y considerando que para poder realizar estudios solares y jovianos en radiofrecuencia se debe contar con un radiotelescopio, se planteó el siguiente problema de investigación:

¿Es posible diseñar y construir un sistema electrónico para el monitoreo de las radioemisiones solares y jovianas basado en receptores de ondas de radio ajustados en los 20,1 MHz desde el OAUTP?

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Construir un sistema electrónico para la recepción de los fenómenos Solares y Jovianos que producen radioemisiones en 20,1 MHz, a partir de las señales adquiridas desde el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira.

1.2.2 Específicos

Para el desarrollo del presente proyecto se pretenden cumplir los siguientes objetivos específicos:

- Construir un receptor de ondas de radio calibrado en 20.1MHz para detectar las emisiones de radioondas provenientes del Sol y del planeta Júpiter.
- Diseñar y construir una antena que se acople al receptor de ondas y que cuente con las características físicas apropiadas, de tal forma que se puedan captar las señales Solares y Jovianas.
- Ajustar el software que procesará y almacenará los registros de las radio emisiones provenientes del Sol y de Júpiter para su posterior análisis y estudio.
- Crear una base de datos de los registros de las radioemisiones medidas desde el OAUTP empleando el sistema en conjunto (receptor, antena, software) implementado por el grupo de investigación en Astroingeniería ALFA ORIÓN que permita la realización de estudios e investigación afines en un futuro.

1.3 Antecedentes

El universo conocido es tan amplio y vasto que hasta la fecha el conocimiento disponible acerca de él, a fin de cuentas, termina siendo un poco vago y somero. Debido a esa grandeza característica, se requiere una gran cantidad de herramientas de estudio que son utilizadas por los investigadores y astrónomos para develar nueva información y ampliar los horizontes del conocimiento humano. Entre todas esas herramientas de estudio se encuentra la astronomía observacional, que se encarga de la parte óptica de los avances astronómicos, la espectroscopia, que se encarga de estudiar la composición química de los cuerpos celestes, y también la astrometría cuyo objetivo es estudiar los fenómenos mecánicos y dinámicos de estos. Si bien estas herramientas han sido de vital importancia en las últimas décadas y han aportado un porcentaje considerable de la información actual sobre el universo, existen limitaciones físicas que impiden que dichas ramas de la astronomía sigan apotando, de modo que se ven restringidas ya bien sea en la parte instrumental o teórica, por lo cual los avances astronómicos también se ven limitados.

Afortunadamente para la ciencia, a finales del año 1920 de la mano del que se convertiría en el pionero de una nueva rama de la astronomía, un joven ingeniero americano llamado Karl Jansky, da los primeros pasos para el nacimiento de la que sería la herramienta astronómica que mayor información sobre el universo aportaría, debido a las pocas limitaciones físicas e instrumentales que poseería. Casi que de manera accidental Jansky, realizando algunos

estudios sobre la interferencia que se producía en las comunicaciones terrestres de larga distancia, descubre algunas emisiones de radio de origen cósmico, lo cual se constituye hoy en día como el objeto de estudio de la Radioastronomía. Esta es una rama de la astronomía que estudia los objetos celestes y los fenómenos astrofísicos midiendo su emisión de radiación electromagnética en la región de radio del espectro. Para tal efecto emplea los denominados radiotelescopios, con los cuales a diferencia de los telescopios ópticos, no se pueden captar imágenes, sino que se puede medir la intensidad de las radio ondas recibidas del espacio exterior.

La intención ahora es presentar el panorama general de lo que han sido los avances radioastronómicos en la ciencia a lo largo de la historia, los descubrimientos realizados, la importancia de su estudio, la instrumentación necesaria y el trabajo que se puede desarrollar, de una manera no cronológica sino estructural, empezando por el objeto de estudio que son las radio ondas de origen cósmico, luego la forma de medir esas señales y poderlas diferenciar de otras que no son de interés, la parte instrumental, los desarrollos y avances actuales y los trabajos a realizar.

Desde los inicios de la radioastronomía con Jansky y Reber, han sido cientos los artículos relacionados con este importante área de la física que se han publicado alrededor del mundo, entre ellos revisiones bibliográficas como la que se realiza en [1] en el año de 1946, en la cual se exponen los avances científicos relacionados con la energía de radiofrecuencia proveniente del Sol y registrada con un radio telescopio de longitud de onda de 1,5 m, es decir, 200 MHz, el cual consistía en un arreglo de 40 dipolos de media onda con un reflector plano, conectado a un receptor con un factor de ruido de 9 dB y equipado con un medidor de salida de ley del cuadrado. De esa forma se revisaron los primeros avances en radioastronomía realizados por los pioneros Jansky y Reber y las emisiones medibles del Sol y las radiofrecuencias decamétricas que parecían originarse en la región de la Vía Láctea. Esto cambió totalmente el panorama, pues se demostró que esa interferencia que se producía en las comunicaciones de larga distancia no eran de señales terrestres, sino que pertenecían a objetos del espacio exterior, lo cual posteriormente se verificó al estudiar la radiación térmica producida, deduciendo que esta estática cósmica se originó en el espacio interestelar. Se encontró que los picos de radiación de 200 MHz coincidían con los picos de la curva de área de las manchas solares y con el paso de grupos de manchas solares por el meridiano, lo cual indicó que existía una fuerte relación física entre ambos fenómenos, lo cual abrió las sendas para un estudio más profundo en este tema dando origen a la radioastronomía.

De esa manera, ahora entraba a jugar un papel sumamente importante la instrumentación electrónica de los proyectos radioastronómicos, que al igual que la conceptualización física de los fenómenos que se estudian actualmente en esta importante rama de la astronomía, se convertía en uno de los primeros limitantes físicos a los cuales se vieron enfrentados los astrónomos e investigadores para poder realizar sus avances científicos en el área. Por ello en [2], se propone realizar una presentación general de los principios de los receptores y las antenas de radioastronomía: Estudiar la temperatura de ruido del sistema, la sensibilidad de los diferentes tipos de receptores y su calibración. También el análisis del rendimiento de otros tipos de receptores como el receptor Dicke, el receptor Graham y el receptor de eliminación de conmutación, presentando de manera clara y organizada las características de cada uno; todo esto sustentado bajo la matemática que rige los fenómenos electromagnéticos relacionados con el estudio en bajas frecuencias. Este trabajo concluye con la presentación de una tabla donde se muestra de manera comparativa la sensibilidad de los diferentes tipos de radiotelescopios receptores con respecto al receptor que teóricamente tiene mayor sensibilidad, que es el receptor de energía total con $a = 1$, luego los receptores Graham y de Correlación con $a = 1.41$, seguidos por el receptor Dicke y de Conmutación con $a = 2$, y dos variaciones del receptor Dicke con $a = 2.22$ y $a = 2.83$, respectivamente. Finalmente se lograron establecer los parámetros y características generales de los diferentes tipos de radiotelescopios, elementos para su construcción (antena, amplificador, filtro, software), al igual que la sensibilidad y la ganancia de cada uno, la conceptualización física y electrónica de cada montaje, encontrando las configuraciones más apropiadas desde el punto de vista de la señal que se desee medir o estudiar.

Posteriormente en el estudio radioastronómico y contando con las herramientas necesarias, es decir, los receptores expuestos en el párrafo anterior, a los radioastrónomos se les hizo necesario poder identificar y distinguir las señales que estaban midiendo, pues si bien la tecnología con la que contaban les permitía adquirir las señales procedentes del espacio, no podían con facilidad afirmar a que cuerpo celeste pertenecían dichas señales. Por ello en [3], se propone el problema de determinar si existe una relación entre los niveles de radiación de fondo de ondas de radio y el número de manchas solares diarias. Además se plantea el problema de determinar si existe una relación entre los niveles de radiación de ondas de radio de Júpiter y la difracción entre el ocultamiento y el tiempo de observación. Para tal efecto, se usan dos estaciones de telescopios radio jove con antenas dipolo dual sintonizadas en 20.1 MHz y se usan 12 imágenes para el Sol y 24 imágenes para Júpiter. Como resultados, se obtiene una relación exponencial entre el número de manchas solares diarias y el nivel de radiación

de fondo con un $R^2 = 0.18$ para el caso del Sol. Para Júpiter, se encontró que el nivel de radiación de fondo es inversamente proporcional a la diferencia temporal entre la observación y el ocultamiento, con datos con $R^2 = 0.08$ en el mejor de los casos. Como es claro, los resultados obtenidos cuentan con una alta dispersión por lo cual se hace necesario proponer la realización de trabajos futuros que disminuyan tal dispersión y aumenten la veracidad de los resultados obtenidos.

Luego de que los científicos se dieron cuenta que dos de los cuerpos celestes de los cuales mayor cantidad de emisiones de radio se podían medir debido a su proximidad a la Tierra y sus alta actividad magnética eran el Sol y Júpiter, continuaron con los trabajos relacionados para aumentar la fiabilidad de los datos. Para ello, un grupo de investigadores en [4] se plantea el problema de la construcción desde cero de un arreglo compuesto por una antena y un receptor de ondas de radio, con el objetivo de estudiar las ondas provenientes tanto del Sol como de Júpiter. Se usaron dos antenas con sus respectivos receptores en lugares previamente estudiados, de tal forma que se encontraran tan libres como fuera posible, de interferencias de otros dispositivos y fenómenos ajenos a las señales estudiadas. Se usaron dos computadores y dos receptores con el objetivo de verificar la validez de los datos. Para estudiar, guardar y analizar los datos recibidos se usó el software Radio SkyPipe. En el caso del Sol, se recibieron datos que en algunos casos eran picos muy estrechos en duración y grandes en amplitud de onda que indican la ocurrencia de llamaradas solares y además se encontraron curvas como colinas que son indicadores de explosiones solares. Se encontró que generalmente, las explosiones solares siguen después de las llamaradas. Para el caso de Júpiter, no se pudo hacer un estudio detallado puesto que el planeta se encontraba opuesto a la Tierra durante el día. Sin embargo, las observaciones nocturnas produjeron resultados de las emisiones de Júpiter que están de acuerdo con los datos generados y usados por astrónomos con equipos más especializados.

En [5], al igual que en los dos artículos anteriores, el problema de investigación que se planteó T. Hidayat y su grupo de radio astrónomos en 2009, fue el monitoreo diario de las llamaradas solares y las emisiones decamétricas de Júpiter como un medio para incentivar la investigación y la educación en el observatorio de Bosscha, Indonesia. Para ello se propuso la construcción de dos radiotelescopios (un radiotelescopio parabólico con un diámetro de 2,3m que trabaja en los 1420 MHz y un Radio Jove con antena dipolo dual que opera en los 20.1 MHz) y dos radio interferómetros (uno multi-elemento y otro con seguimiento en dos dimensiones compuesto por cinco antenas). Se diseñaron estos cuatro instrumentos con las

características específicas que requerían cada uno, siguiendo las instrucciones del manual de la NASA para los radiotelescopios y construyendo las matrices de síntesis de apertura para los interferómetros, se calibraron, se ubicaron apropiadamente las antenas empleando GPS y se inició con la adquisición de datos. Se concluyó con éxito parcial el proyecto puesto que en su primera etapa los resultados y datos analizados fueron los esperados, logrando caracterizar los radiotelescopios y realizando mediciones sobre la actividad solar y las emisiones de Júpiter empleando el software de Radio SkyPipe, mientras que para la parte del montaje de los interferómetros se encontró que si bien la sensibilidad no era la esperada, se puede mejorar, estableciendo para ello el estudio de configuraciones donde las antenas se puedan montar en lugares relativamente libres y lejos de edificios altos u otros obstáculos como árboles o postes al igual que de otros instrumentos electrónicos que puedan sumar interferencia a las señales medidas.

Posteriormente, en el año 2011 el observatorio de Bosscha continuó con sus avances en la línea de radioastronomía [6], con el objetivo de emplear los instrumentos previamente construidos para enfocarse en el estudio de otras fuentes emisoras de radio ondas (líneas espectrales del hidrógeno neutro (HI) en la Vía Láctea o el estudio de la misma desde la emisión HI), pero conservando también los registros de la actividad solar y joviana. Consiguieron montar el gráfico SkyPipe que registra casi que en tiempo real dicha actividad. También solucionaron los problemas que tenían en la segunda parte del proyecto inicial, empleando para ello tecnología de posicionamiento GPS y la herramienta virtual Google Earth logrando sortear el principal problema que tenían de no poseer un terreno plano para las líneas base. Además, establecieron dos configuraciones diferentes denominadas Compacta y Extendida, mientras que a la vez evitaron arboles y obstáculos que pudiesen generar interferencia. Finalmente obtuvieron las radio imágenes con mayor precisión; sin embargo, esta fase es muy joven y se espera que su sensibilidad sea mejor y así obtener la mayor cobertura de UV-posible.

Otro de los radioastrónomos que se unió al proyecto de la NASA fue I. Myserlis en [7], que se propone resolver el problema de cómo poner en marcha una estación de radio de baja frecuencia para el monitoreo de las explosiones solares en el Observatorio de la Universidad Aristóteles de Salónica, Grecia. Construyeron una estación compuesta de una red en fase de una antena de doble dipolo, un receptor de radio de onda corta y un equipo con el software necesario instalado, y al igual que en algunos artículos anteriores, siguieron las instrucciones para la construcción de la antena y el receptor de radio del manual del proyecto Radio JOVE de la NASA. La estación funciona de forma continua desde julio de 2010 en una banda es-

trecha de frecuencias en torno a 20.1 MHz. El sistema se calibró de manera que los datos grabados se expresaran en temperatura de la antena. Para dicha calibración el software que se empleó consistía en dos programas. El primero: Radio SkyPipe II, que fue desarrollado por el equipo de Radio JOVE para la adquisición y el almacenamiento de datos, cuya tarea principal es producir un gráfico en tiempo real de la energía de la señal recibida y almacenar estos archivos en formato ASCII. El segundo: Loop Recorder Pro 2.06, para investigar y excluir la interferencia natural. Se grabó la salida de audio del receptor en una base de 24 horas y por último se usó un generador de frecuencias que calibraba el receptor con precisión del orden de los kHz. Se calibró el programa de Radio SkyPipe con el fin de obtener los resultados en términos de la temperatura de la antena y no en las unidades de potencia arbitrarias que utiliza originalmente. Finalmente y a pesar del alto nivel de interferencia de una región urbana como Tesalónica, se obtuvieron varias detecciones de baja frecuencia que se correlacionaron con las erupciones solares, eventos de rayos X y otras observaciones solares de baja frecuencia. Actualmente las señales recibidas se controlan y están archivadas en formato ASCII ordinario y también como señal de audio, con el fin de investigar y excluir interferencias de radio realizadas por el hombre. Se lograron también excluir señales de interferencia de banda estrecha y se calcularon los índices espectrales de las erupciones solares observadas, concluyendo así que el número de las explosiones registradas parece seguir de cerca el ciclo de la actividad solar, ya que ha aumentado durante los últimos años de manera creciente en la aparición de manchas solares.

Otros observatorios astronómicos también se dieron cuenta de la relevancia del estudio radioastronómico, y abordando nuevos horizontes se han llegado a resultados que permiten que el conocimiento del universo cada vez sea más amplio. Un ejemplo de esto es la investigación planteada en [8], que consiste en estudiar la estrecha dependencia existente entre las condiciones ionosféricas y la actividad solar. Es importante estudiar cómo los fenómenos solares afectan a la propagación de las ondas de radio. Para ello, los investigadores de la Universidad de Florida adoptaron el proyecto Radio JOVE de la NASA para monitorear las emisiones de radio de Júpiter y el Sol, construyendo un radio telescopio que constaba de un receptor de 20,1MHz conectado a un calibrador y a un arreglo de dipolos. La salida del sistema se conecta a la tarjeta de sonido de un equipo que emplea el software Radio Skypipe, que registra los cambios de amplitud en función del tiempo y proporciona diversas herramientas gráficas y de análisis, así como la capacidad de compartir datos con otros astrónomos en Internet. Se estableció una visualización gráfica de todas las lecturas de SNR (relación señal ruido), al igual que un archivo de registro de texto que podría ser utilizado para el análisis posterior

de datos cargándolo desde una base de datos de MySQL y posteriormente ser graficados, visualizados o descargados a través de una interfaz en la Web. Se registraron varios eventos como ráfagas de radio, emisiones solares y detecciones menores que verificaron el buen funcionamiento de los instrumentos. Se concluyó que durante el día, la ionosfera se compone de cuatro regiones: D, E, F1, F2 y cuando una onda de radio golpea la ionosfera, uno de los siguientes tres fenómenos físicos puede ocurrir: Si la frecuencia de radio es demasiado baja, será absorbida por la ionosfera. Si la frecuencia es demasiado alta, se corta y entra en el espacio. Si está en el medio, se refleja de vuelta a la Tierra. También se estableció que el tiempo de retraso entre una gran emisión de onda de radio del Sol y la respuesta de la ionosfera es lineal, es decir, cuanto más fuerte es la emisión de radio más rápida será la CME que llega a Tierra. El rango de velocidades se extendió desde 1520 hasta 500 km / s, normal para tales eventos energéticos. Sin embargo, debido a que una llamarada X9 registrada el 5 de diciembre de 2006 fue apenas detectable por el equipo de Radio Jove, es necesario hacer algunos ajustes de sensibilidad.

Si bien el proyecto Radio Jove de la NASA está dirigido al estudio del Sol y de Júpiter, los diferentes investigadores que lo han acogido se dan a la tarea de buscar cómo aplicarlo a diferentes fenómenos. Así, el problema de investigación abordado en [9] expone la hipótesis de la posible existencia de una relación bien definida en la producción de erupciones electromagnéticas del planeta Júpiter y la actividad del Sol manifestada en los parámetros del viento solar, así como también la influencia que tiene el satélite Io en determinadas posiciones orbitales en el disparo de ciertas emisiones electromagnéticas en este planeta. Para este fin se empleó el Radio Jove del Proyecto de la NASA, capturando las radioemisiones procedentes de Júpiter y las variaciones de la actividad solar en función del número de manchas solares, al igual que su posible relación con la producción o activación de explosiones electromagnéticas en Júpiter. Los resultados que se consiguieron corresponden a la etapa de prueba del proyecto, puesto que se ensamblaron y pusieron a prueba la antena y el receptor, encontrando sus funciones de transferencia y continuando con el registro de las radioemisiones jovianas. Se planteó como trabajo futuro el análisis de la relación señal a ruido para obtener un buen factor de mérito, además de establecer de manera precisa la rotación de Júpiter y el estudio de la actividad solar a partir de comparaciones con la información registrada en el satélite SOHO de la NASA para determinar la posible relación entre las erupciones electromagnéticas de Júpiter y el viento solar.

Continuando con los estudios de las llamaradas solares, alrededor del mundo diferentes in-

vestigadores hicieron sus aportes desde diferentes aspectos. Por ejemplo Kamal M. Abood en su artículo [10], aborda el problema de investigar como las manchas solares tienen un efecto en las señales electromagnéticas de radio cuando estas pasan a través de la capa F de la Ionosfera. Para tal fin elije la siguiente metodología: emplea el radio telescopio del proyecto de la NASA (Radio Jove Project) y de la base de datos del Observatorio de Hawai en EE.UU, con los cuales obtiene cerca de 37611 observaciones de explosiones de Júpiter que fueron recopiladas durante 11 años (1999-2009). Por limitaciones con la ubicación del equipo y la recepción de la antena los registros fueron reducidos a tan solo 337, de los cuales solo 20 corresponden a observaciones reales, sobre las cuales se planteó el estudio, llegando a los siguientes resultados: se encontró que el comportamiento del modelo Ionosférico en función de las observaciones se representa de manera apropiada con una ecuación polinómica de tercer grado, y que el rango del valor K de manchas solares de acuerdo a la representación de la curva se determina directamente como la diferencia entre el número de manchas solares de la observación actual y el número de manchas solares de la curva modelo. Para las observaciones realizadas se obtuvo un rango de 25, lo cual permite concluir que existe una estrecha relación entre el número de manchas solares diarias y el número de observaciones actuales.

De esa forma se presentaron de una manera sistemática algunos de los diversos avances científicos que se han realizado a través de la historia en el área de la radioastronomía, para así generar un punto de partida para el trabajo que se desea realizar aquí; por ello es importante hacer primero una revisión sobre los estudios realizados y posibles trabajos futuros, al igual que los problemas a los que ellos se vieron enfrentados y su manera de superarlos. Los estudios obtenidos sobre el Sol y sobre Júpiter, como se apreció en párrafos anteriores, se pueden realizar desde diferentes perspectivas, planteando diferentes objetivos y metodologías, pues es claro que si bien el conocimiento que se tiene sobre estos dos cuerpos celestes es amplio, también se debe tener en cuenta que aún es mucha la información que se puede obtener de ellos desde el punto de vista de las radio ondas y la relevancia que poseen sobre el planeta Tierra, y que esa información se puede extraer haciendo uso de esa poderosa herramienta para el estudio astronómico conocida como la radioastronomía.

Capítulo 2

Radioastronomía

Cualquier radiación electromagnética que se considere en determinado momento, sea de tipo térmica o no térmica, se puede ubicar fácilmente dentro del espectro electromagnético si se conoce de ella su longitud de onda (λ) o su frecuencia (ν), los cuales son parámetros característicos de cualquier onda electromagnética. En la Figura 2.1 se muestra todo el espectro electromagnético en función únicamente de (λ), el cual va desde el orden de los nanómetros (nm) para los rayos Gamma (γ) y Rayos X (χ), hasta el orden de los kilómetros (km) para las ondas de radio cortas y largas. El énfasis en esta figura se hace en términos de la longitud de onda con la intención de posteriormente dar la introducción a las que serán el tipo ondas electromagnéticas a estudiar en este documento, las ondas de radio decamétricas, que son las que corresponden a longitudes de onda entre los 10 y 100 metros.

La radioastronomía es la rama de la astronomía que estudia los objetos celestes y los fenómenos astrofísicos midiendo su emisión de radiación electromagnética en la región de radio del espectro, dicha radiación recibe el nombre de ondas de radio. Este tipo de ondas fueron detectadas por primera vez en longitudes de onda alrededor de 14,6 metros por el ingeniero Karl. G. Jansky (1905 – 1950) en 1931, por lo cual se le considera como el padre de la radioastronomía. Jansky trabajaba para la compañía de comunicaciones Bell Telephone Laboratories y construyó una antena (Figura 2.2) para estudiar la dirección de la que provenían las interferencias en las comunicaciones de radio transatlánticas. Jansky estuvo cerca de un año registrando con esta antena una emisión de origen desconocido procedente de un punto que se movía con el cielo, una fuente de radio de origen cósmico. En primera instancia pensó que se trataba del Sol, pero tras verificar que el tiempo de repetición de la señal no correspondía a 24 horas sino a 23 horas y 56 minutos (tiempo sideral), en 1935

Jansky identificó que esta emisión era procedente del centro de la Vía Láctea, convirtiéndose en la primera observación radioastronómica de la historia. En 1937, otro ingeniero, Grote Reber, continuando con los trabajos adelantados por Jansky, construyó la primera antena parabólica (Figura 2.2) y realizó el primer mapa de radio emisión de la galaxia. Jansky y Reber, sin saberlo se convirtieron en los pioneros de la que sería la rama de la astronomía que mayor contribución porcentual brindaría a la comunidad astronómica sobre el universo contemporáneo, más del 70% de los conocimientos actuales en astronomía se han obtenido de la mano de la radioastronomía [11].

Al igual que la astronomía óptica que emplea telescopios para realizar sus observaciones e investigaciones, los cuales con el pasar del tiempo y con el avance tecnológico se han visto mejorados y optimizados para aumentar sus prestaciones, la radioastronomía, desde sus inicios se ha valido de los denominados radiotelescopios, un tipo de instrumento que no registra luz visible sino ondas de radio, que desde la época de Jansky ha cambiado significativamente en tamaño y prestaciones, siempre con la intención de dar un poco más al saber científico. En el siguiente apartado se hace mayor énfasis en la estructura y características de los radiotelescopios y cómo estos han permitido a los astrónomos ampliar su conocimiento del cosmos.



Figura 2.1: Espectro electromagnético en función de la longitud de onda¹.

Todo tipo de radiación electromagnética viaja en el espacio vacío a una velocidad aproximada de $3 \times 10^8 m/s$, esta velocidad corresponde a una constante universal llamada velocidad de la luz (c), esta constante relaciona los parámetros (λ) y (ν) a través de la ecuación (2.1), la cual muestra una relación inversamente proporcional entre ambos parámetros [12].

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2.1)$$

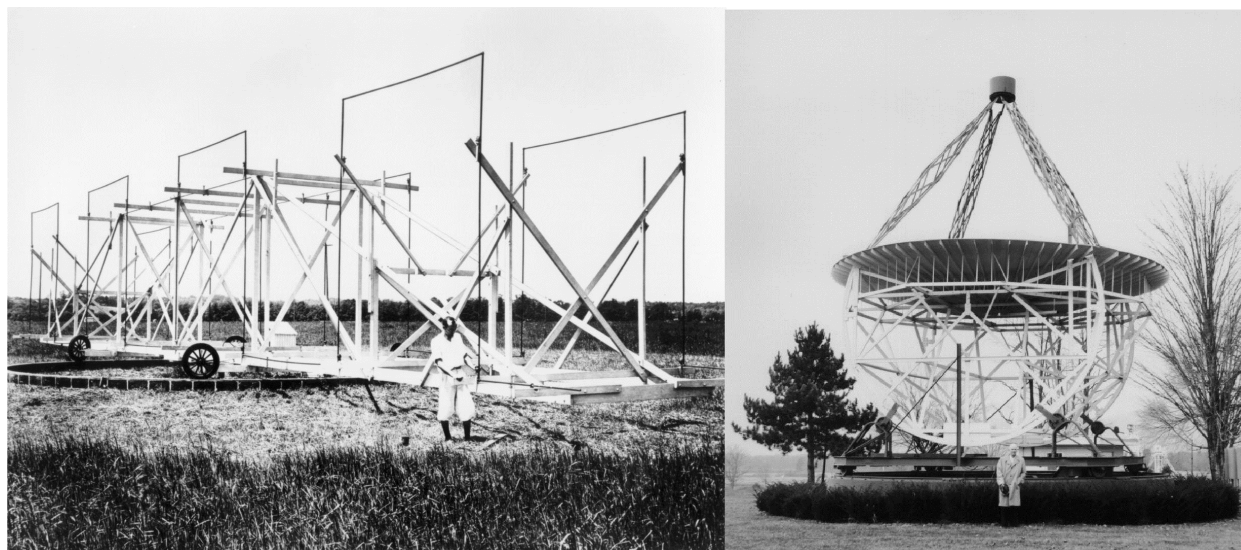


Figura 2.2: Izquierda: Karl Jansky junto a su antena tipo dipolo de 14,6 m para el estudio de la interferencia transatlántica. Derecha: Grote Reber junto la primera antena parabólica construida para realizar radioastronomía².

Por otro lado, no todas las ondas electromagnéticas tienen las características apropiadas para ingresar a la Tierra, esto se debe a que la atmósfera terrestre por su estructura y composición química, actúa como filtro para la mayor cantidad de las ondas del espectro electromagnético, como es el caso de las ondas de radiación ultravioleta, emisiones infrarrojas, rayos χ y rayos γ , los cuales se ven apantallados por esta. De tal forma que la atmósfera permite el ingreso únicamente de la luz visible y las ondas de radio, creando así las denominadas ventanas espaciales que se ilustran en la Figura 2.3.

¹Fuente: <http://astrojem.com/teorias/espectroelectromagnetico.html>

²Fuente: <http://www.mdscc.nasa.gov>

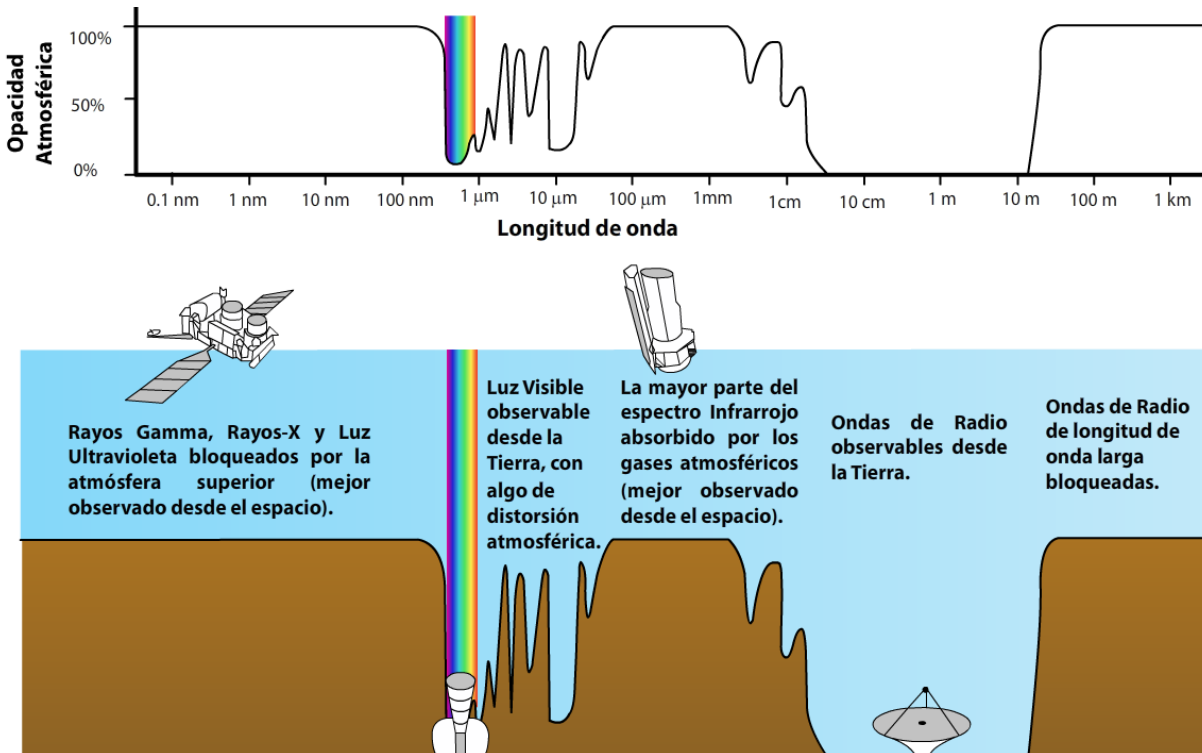


Figura 2.3: *Ventanas espaciales: Ventana de radio y ventana del visible*³.

Dichas ventanas hacen posible las observaciones en la astronomía óptica y en la radioastronomía, también son las que permitieron que Jansky y sus sucesores tuviesen éxito en sus experimentos. Hoy en día, estas ventanas son las que permiten que esta ciencia desde la Tierra sea posible y cada vez adquiera más interés por parte de la comunidad científica, prueba de ello son la gran cantidad de radiotelescopios y proyectos radioastronómicos alrededor del mundo, como el gran radiotelescopio de Arecibo, en Puerto Rico, construido en 1963 con una antena parabólica fija al suelo de un diámetro de 305 metros, o los muchos complejos interferométricos en funcionamiento: VLBI, VLA, MERLÍN, Nobeyama o IRAM, que trabajan en diferentes rangos espectrales de radio y por último el más ambicioso y complejo proyecto para la radioastronomía, que es el ALMA (Atacama Large Millimeter Array) que, cuando entre en funcionamiento con sus 66 antenas, revolucionará el mundo de la radioastronomía tal como lo hizo Jansky hace más de 80 años⁴.

³Fuente: http://www.pawean.com/MVM/Telescopios_orbitales.html

⁴Atacama Large Millimeter/submillimeter Array - <http://www.almaobservatory.org/>

2.1 Radiotelescopios

El estudio de objetos celestes como pulsares, estrellas o núcleos activos de galaxias (AGN) que se encuentran a años luz de distancia de la Tierra, e incluso el estudio del Sol y de Júpiter, en ocasiones se hace complejo desde la astronomía óptica debido a la instrumentación que se requiere para realizarlo, tanto así que hasta el mismo clima se convierte en un obstáculo que dificulta las observaciones y genera problemas a la hora de realizar las investigaciones pertinentes. Por esta razón es que la radioastronomía ha adquirido tanta relevancia en los últimos años, la no dependencia del clima, una menor complejidad en la instrumentación, un ancho de banda mayor en las observaciones y otros factores más, se convierten en alicientes para prestar mayor atención a esta ciencia astronómica y a la herramienta que la hace posible, el radiotelescopio. Un radiotelescopio es un arreglo electrónico compuesto por tres elementos principales: La antena, el receptor y el software, cada uno de ellos debe atender a tres criterios clave: Gran sensibilidad, bajo ruido y alta resolución.

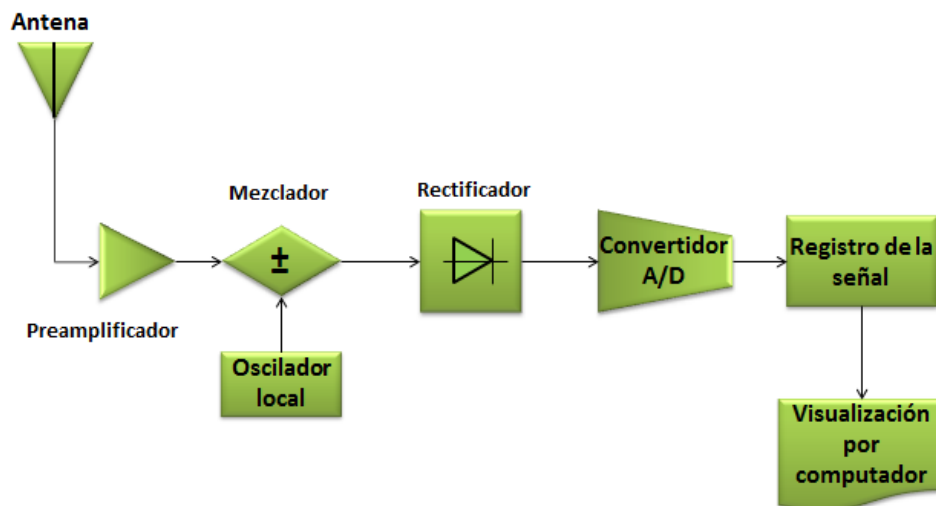


Figura 2.4: *Diagrama de bloques básico de un radiotelescopio.*

Estos tres criterios se optimizan variando determinados parámetros dentro del esquema básico del radiotelescopio, añadiendo etapas de preamplificación, etapas de filtrado, mezclado y rectificado de la señal, mejorando los parámetros físicos de la antena o aumentando el tiempo de muestreo en el software. De modo tal que es posible presentar un esquema básico de un radiotelescopio donde se tengan en cuenta de manera global cada uno de estos parámetros, la Figura 2.4 corresponde a este diagrama esquemático y a la vez muestra el flujo de la señal recibida. Un radiotelescopio mide la variación de intensidad de señal de las

radiofuentes, es decir, que tanto varía la potencia inducida por la onda electromagnética incidente en los terminales de la antena en función del tiempo. Con este tipo de señales es posible obtener mediante un procesamiento previo, algo llamado radioimágenes, que es un tipo de imagen particular que muestra cómo se vería determinada radiofuente si fuese posible verla desde el radioespectro.

A diferencia de un telescopio óptico, las radioimágenes que se obtienen con los radiotelescopios no están compuestas por pixels, sino por una gran colección de datos de la radiofuente observada, un complejo conjunto de información que requiere un procesamiento especial para luego poder ser visualizada en la pantalla de un computador. Este conjunto de datos se obtiene haciendo paneos sobre la radiofuente, aprovechando la alta resolución de los radiotelescopios (miliarcosegundos para radiotelescopios profesionales) y asignando un color a cada valor de intensidad de señal registrado o generando contornos con curvas que unen puntos de igual intensidad de señal. En la Figura 2.5 se presenta un ejemplo de esto con una foto tomada a la Vía Láctea. Para concluir, es importante tener claro que sin radiotelescopios no sería posible

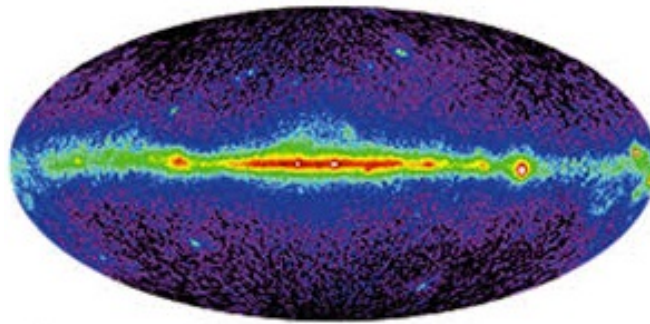


Figura 2.5: *Radioimagen de la Vía Láctea*⁵.

la radioastronomía tal como se conoce hoy en día y que para tener un buen radiotelescopio se deben satisfacer los tres criterios mencionados con anterioridad, una gran sensibilidad debido a que los potenciales eléctricos generados por las radio ondas que se miden en la antena son muy pequeños; bajo ruido puesto que la interferencia de señales indeseadas puede afectar los registros lo cual requiere de una alta selectividad de señal. Por último, alta resolución para obtener mayor precisión y fidelidad de los datos medidos. En el siguiente apartado se hará énfasis en uno de los elementos del radiotelescopio sobre el cual recae mayor responsabilidad a la hora de cumplir con dichos criterios, la antena.

⁵Fuente: Christine Jones. Fuente: <https://www.cfa.harvard.edu/sao/>

2.2 Teoría de Antenas

Una antena es un instrumento diseñado con el objetivo de emitir o recibir ondas electromagnéticas hacia el espacio. Una antena receptora (como es el caso de este proyecto), transforma una señal electromagnética procedente desde el espacio exterior en energía eléctrica, es decir, en un voltaje. La antena capta las débiles señales electromagnéticas que han viajado millones de kilómetros desde el Sol o desde Júpiter hasta la Tierra. Cuando estas ondas golpean el cable de la antena, un pequeño voltaje de radio frecuencia (RF) se genera en los terminales de esta. Finalmente dicha señal es entregadas a los terminales del receptor por el cable de transmisión coaxial.

Existen varios parámetros a tener en cuenta a la hora de realizar los ajustes de localización y alineación de las antenas a emplear, como los son: La declinación, latitud y ángulo de elevación del Sol y de Júpiter que corresponden a parámetros de ubicación. Por otro, lado estarán lo que se denominará respuestas electromagnéticas de la antena (ganancia y patrón de radiación), que corresponden a parámetros intrínsecos de cada antena y que se explicarán en detalle más adelante. Ambos tipos de parámetros dependerán del tipo de antena que se emplee y del tipo de señal que se desee registrar. Para fines del presente proyecto se empleará una antena magnética tipo lazo circular y en la siguiente sección se explicará y entrará en detalle del por qué de este hecho.

2.2.1 Antena dipolo

Generalmente, la actividad joviana en radiofrecuencia es estudiada por radioastrónomos mediante radiotelescopios con antenas tipo dipolo. Por ejemplo, en [13], se estudian las radio emisiones decamétricas jovianas (REDJ) en 18.0, 22.2 y 27.6 MHz, y su relación con el comportamiento de la gran mancha roja presente sobre la superficie de Júpiter. Así mismo, en [14] se analiza cómo estas mismas radioemisiones influyen en la actividad y apariencia física del área ecuatorial del planeta. En ambos casos se emplean datos suministrados por un receptor de radio ondas y una antena dipolo, y se correlacionan con datos de coeficientes fotométricos suministrados por observaciones en el óptico, encontrando que los coeficientes de correlación son altos, lo cual evidencia una estrecha relación entre el comportamiento en radio ondas y en óptico que se presenta en el planeta Júpiter. Es claro, que las antenas dipolo han jugado un papel importante en el estudio de las REDJ, ya que poseen un patrón de radiación bidireccional, lo que las hace apropiadas para el seguimiento del planeta Júpiter si se orientan de manera adecuada. También cuentan con un ancho de banda amplio, lo

que las hace el tipo de antena indicada para el extenso espectro de emisión joviano. Es por ello que entre el 2007 y 2013 la producción de artículos científicos acerca de los fenómenos jovianos y en los que se utilizan las antenas dipolo ha sido bastante amplia. Es así como en [15] y [16] se emplean las antenas dipolo para estudiar la probabilidad de producción de emisiones jovianas y su relación con las variables angulares correspondientes a cada una de las fuentes de radiofrecuencia de Júpiter; en [17] y [18] los desarrollos están enfocados en la configuración apropiada del radiotelescopio, desde su ubicación óptima mediante dispositivos GPS y mediciones meteorológicas, hasta la implementación de software y hardware adicional para mejorar los registros de audio y la correcta predicción de eventos. En [19] y [20], la atención recae directamente sobre el receptor de ondas y la antena, el diseño electrónico por medio de filtros en frecuencia y la optimización de los parámetros electromagnéticos, de modo que el sistema en conjunto sea más eficiente a la hora del registro y la adquisición de datos.

Sin embargo, en estos trabajos se evidencia que las antenas tipo dipolo presentan dos fuertes desventajas. La primera y más relevante consiste en que al tratarse de antenas muy grandes en tamaño, ocupan una gran área, lo cual significa que no siempre es sencillo encontrar un lugar adecuado con el espacio suficiente para instalarlas. Por ejemplo, para el caso particular del registro en 20 MHz, se requiere una antena de 7 m de largo por 3 m de ancho, que se traduce en un área de $21m^2$. En segundo lugar, estas antenas se ven ampliamente afectadas por el ruido eléctrico, por lo que se deben ubicar en áreas alejadas de equipos electrónicos o redes de transporte de energía eléctrica. Desafortunadamente, el OAUTP no cuenta con el espacio necesario para instalar una antena dipolo, y aún si se pudiese ubicar, el ruido eléctrico local sería demasiado alto debido a que este se encuentra ubicado en un edificio con actividad constante y cerca de redes eléctricas.

Esta situación hizo que fuera necesario explorar la posibilidad de adelantar la observación de la actividad joviana y solar en ondas de radio a través de antenas de menor tamaño y con una susceptibilidad al ruido eléctrico inferior a la registrada en las antenas dipolo. En [21], se realiza la construcción de un radiotelescopio con una antena particular que cumple con las características deseadas, denominada antena magnética circular o antena isoloop (lazo-aislado).

Esta antena es empleada, en este caso, para estudiar las tormentas jovianas que producen actividad electromagnética en radio ondas, siendo este un objetivo muy similar al del presente proyecto. Aunque la antena isoloop es comúnmente empleada en radiocomunicaciones HF terrestres aficionadas o para comunicaciones militares, debido a que su factor de calidad y

su versatilidad la hace muy eficaz para la solución de problemas de modulación, transporte e instalación; también es posible encontrarlas dentro de proyectos diversos como la identificación por radio frecuencia (RFID) [22], instrumentación biomédica inalámbrica [23], y en diferentes aplicaciones de radiofrecuencia y comunicaciones [24].

Considerando lo anterior, se decidió realizar el diseño, la construcción y la implementación de una antena circular magnética, de tal forma que, sin incurrir en las relativamente grandes áreas de instalación que requieren las tradicionales antenas dipolo y disminuyendo la susceptibilidad del sistema al ruido eléctrico, fuese posible cumplir los objetivos del proyecto, es decir, registrar las emisiones solares y jovianas en la banda decamétrica.

2.2.2 Antena magnética circular isoloop

Las antenas isoloop aparecieron por primera vez en la transmisión y recepción de señales electromagnéticas entre los años 1915 a 1920, posteriormente fueron reemplazadas por antenas de hilo de mayor tamaño y eficiencia en 1930, volviendo a reaparecer y a tomar fuerza en el año de 1938, donde nuevamente fueron implementadas con el objetivo de disminuir el tamaño y a la vez proveer una herramienta útil en radiocomunicaciones con características apropiadas en los canales UHF y de televisión, tales como un tamaño reducido, gran versatilidad, alta selectividad y reducción de ruido logrando atenuaciones de hasta 30dB para frecuencias externas a la frecuencia de operación.

Generalmente, las antenas isoloop constan de dos lazos conductores denominados lazo primario y lazo secundario. Este último opera como un inductor de un solo devanado y sus terminales van conectados a un capacitor variable de alto voltaje que permite sintonizar la resonancia de la antena en una frecuencia en particular. El lazo secundario induce la señal electromagnética captada sobre el primario, el cual se ubica al interior de la antena en el lado opuesto al del capacitor, y con sus terminales conectados por cable coaxial a un transmisor o a un receptor de radio ondas [25].

Este tipo de antena y su configuración, son un circuito RLC conformado por el capacitor variable, la inductancia del conductor secundario y una resistencia de pérdida generada por el conductor. Este circuito es denominado circuito tanque y su esquema circuital se aprecia en la Figura 2.6.

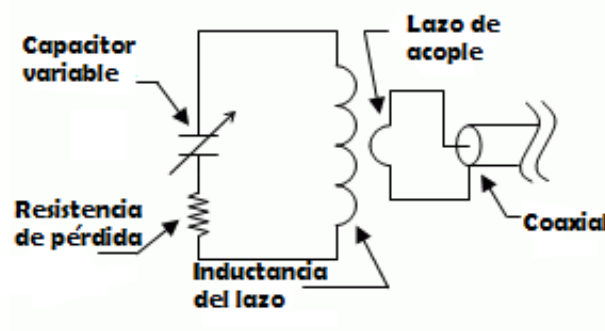


Figura 2.6: Esquema circuitual equivalente de la antena isoloop diseñada.

El diámetro de las antenas isoloop, es decir, el tamaño del lazo secundario, define la frecuencia de operación deseada y el tipo de antena. Las antenas con $C \sim \lambda$, donde C es la circunferencia del lazo secundario, son denominadas eléctricamente grandes, mientras que antenas con $C < 0.1\lambda$ son denominadas eléctricamente pequeñas. En este proyecto se construyó una antena eléctricamente grande con $C = 2.82m$ para un $\lambda = 14.9m$ que es la longitud de onda de interés. De tal forma que para un lazo de corriente I , el radio a debe satisfacer:

$$a < \frac{\lambda}{6\pi} \quad (2.2)$$

La relación dada por la ecuación (2.2) se obtiene de la aproximación de primer orden de la función de Bessel de primer grado, la cual establece un rango de posibles valores para el tamaño de una antena isoloop eléctricamente pequeña. Por otra parte, los campos eléctrico y magnético en zona lejana están dados por el conjunto de Ecuaciones (2.3) que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} E_{\varphi}(\theta) &= \beta\eta(I_0a)\frac{e^{-j\beta r}}{2r}J_1(\beta a \text{Sen}(\theta)) \\ H_{\theta}(\theta) &= -\frac{E_{\varphi}}{\eta} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Donde J_1 representa la función de Bessel de primer orden, mientras que β y η corresponden a la constante de fase y a la impedancia intrínseca del medio, respectivamente. A partir de estas dos expresiones se obtiene el patrón de potencia para una antena isoloop, el cual está dado por la ecuación (2.4), siendo idéntico al patrón generado por una antena tipo dipolo, tal como se mencionó en párrafos anteriores.

$$F_{\theta} = \text{Sen}^2\theta \quad (2.4)$$

Finalmente, la potencia radiada y la resistencia de radiación se pueden obtener mediante las siguientes expresiones (Ecuaciones (2.5)):

$$\begin{aligned} P_r &= \frac{1}{12\pi} \eta \beta^4 (IA)^2 \\ R_r &= \eta \frac{8}{3} \pi^3 \frac{A}{\lambda^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Donde A corresponde al área del lazo secundario y el parámetro $\eta = 120\Omega$ en el espacio vacío [26].

2.3 Radiofuentes

El estudio radioastronómico de los cuerpos celestes se clasifica según el tipo de radiofuente particular que se estudie, estas fuentes son todos aquellos cuerpos del universo que emitan radiación electromagnética dentro de la ventana de radio, y se clasifican como sigue [27].

Según la temperatura:

- **Térmicas:** Es aquella radiación que depende exclusivamente de la temperatura emitida por un cuerpo y se describe en función de la Ley de Planck.
- **No térmicas:** Se describen en función de las interacciones de partículas cargadas con campos magnéticos.

Según su espectro electromagnético:

- **Continua:** Con un amplio rango de frecuencias.
- **De línea espectral:** Con un estrecho rango de frecuencias o una frecuencia particular.

Según su posición:

- **Galáctica:** Radiofuentes dentro de la vía láctea.
- **Extragaláctica:** Radiofuentes fuera de la vía láctea.

Según esta clasificación y partiendo del hecho de que los objetos de estudio del presente trabajo son el Sol y el planeta Júpiter se pasa a definir los fenómenos solares y jovianos desde la perspectiva radioastronómica.

2.3.1 Sol

El Sol, aparte de ser el centro gravitacional que rige los movimientos planetarios y de los demás cuerpos celestes dentro del sistema solar, es también un importante protagonista dentro los fenómenos electromagnéticos que se generan al interior de dicho sistema, y que afectan de alguna manera las condiciones de vida dentro del planeta. Es la estrella más cercana a la Tierra, brinda calor, luz y es la principal fuente energética para la vida terrestre como la conocemos y según la clasificación anterior es un cuerpo térmico, galáctico con espectro de emisión continua, puesto que como se mencionó antes emite radiación en todo el espectro conocido, lo cual se describe en función de la ley de Planck, tal como muestra la ecuación (2.6).

$$I(f, T) = \frac{2\pi f^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{KT}} - 1} \quad (2.6)$$

Donde $I(f, T)$ representa la intensidad de radiación electromagnética, f es la frecuencia de emisión, T es la temperatura a la cual se encuentra el cuerpo y h , c y K son la constante de Planck, la velocidad de la luz y la constante de Boltzman, respectivamente. El monitoreo y estudio del Sol es vital para la comunidad científica puesto que su actividad tiene múltiples repercusiones sobre distintos ámbitos de la vida terrestre, tales como el clima, la agricultura, la salud y las telecomunicaciones. De allí, que actualmente la predicción del comportamiento solar sea uno de los principales temas de estudio en astronomía alrededor del mundo, debido a que los diferentes fenómenos físicos que se generan en él representan un factor clave para incentivar el desarrollo tecnológico y científico de diversas técnicas astronómicas que brinden información sobre el futuro proceder del Sol [28]. La radioastronomía es una de estas técnicas astronómicas, se encarga de estudiar las emisiones de onda de radio provenientes del espacio exterior y con base en estas mediciones determinar parámetros físicos de los astros que las generan.

El Sol, desde una perspectiva distinta, puede ser clasificado también como un cuerpo no térmico, debido a que emite ondas electromagnéticas tipo ondas de radio en función de la actividad del campo magnético solar por mecanismos de sincrotrón o ciclotrón⁶, es allí donde la radioastronomía se aplica en este proyecto, se enfoca en las emisiones de radio ondas y los fenómenos solares que las generan. Las llamaradas solares (Solar Flares), las eyecciones

⁶Mecanismos de emisión de ondas electromagnéticas (no térmicas) por medio de la interacción de partículas cargadas con un campo magnético.

de masa coronaria (EMC), las manchas solares y el viento solar, son los fenómenos más importantes y de mayor estudio que se generan en el Sol. Estos, en conjunto con el campo magnético solar, producen emisiones de tipo térmicas y no térmicas con potencias promedio de 3.8×10^{26} Watts, de los cuales la Tierra únicamente recibe 1.37 W/m^2 , correspondientes a la luz visible y a las ondas de radio que atraviesan la atmósfera como si esta fuese transparente e inciden directamente sobre la superficie terrestre⁷.

Llamaradas solares

Una llamarada solar es una violenta explosión en la fotosfera del Sol con una energía de hasta 6×10^{25} Julios, asociada con el aumento en la emisión de radiación electromagnética y la emisión de partículas con carga eléctrica (principalmente protones y electrones) del Sol. Se producen en la corona solar y la cromósfera, calentando el plasma a decenas de millones de kelvin y acelerando los electrones, protones e iones a velocidades cercanas a la de la luz. Estas generan radiación electromagnética en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, desde los más cortos rayos gamma hasta largas ondas de radio [28]. En la Figura 2.7 se aprecia una llamarada solar clase X4.9 captada el 25 de Febrero de 2014 por el Observatorio de Dinamica Solar de la NASA (SDO). En esta imagen se aprecia la gran magnitud de la llamarada que satura la parte lateral izquierda del Sol con un fulgor que corresponde a una gran emisión de energía electromagnética liberada en un lapso muy corto de tiempo. Esta llamarada fue una de las más potentes producidas durante el año 2014. Las emisiones producidas por las llamaradas solares viajan hacia la Tierra llevando información importante de la actividad solar. El registro, procesamiento e interpretación de dicha información se realiza con radioastronomía. Al llegar a la atmósfera terrestre, las ondas electromagnéticas y las partículas con carga quedan atrapadas y circulan alrededor de las líneas de campo magnético terrestre, lo cual causa un cambio en la velocidad de la partícula y en la emisión de ondas de radio en un fenómeno conocido como Bremsstrahlung magnético o frenado magnético, donde la frecuencia emitida es función de la intensidad del campo magnético y de la velocidad inicial de la partícula. Este frenado explica la radiación electromagnética tipo onda de radio a bajas energías, es decir, radiación térmica, mientras que la radiación de más alta energía, es decir, la no térmica, corresponde al mecanismo de sincrotrón, donde los electrones poseen velocidades mucho mayores que en el caso anterior e interactúan con campos magnéticos.

⁷<http://atmospheres.gsfc.nasa.gov/climate/?section=136>

⁸Fuente: <http://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>

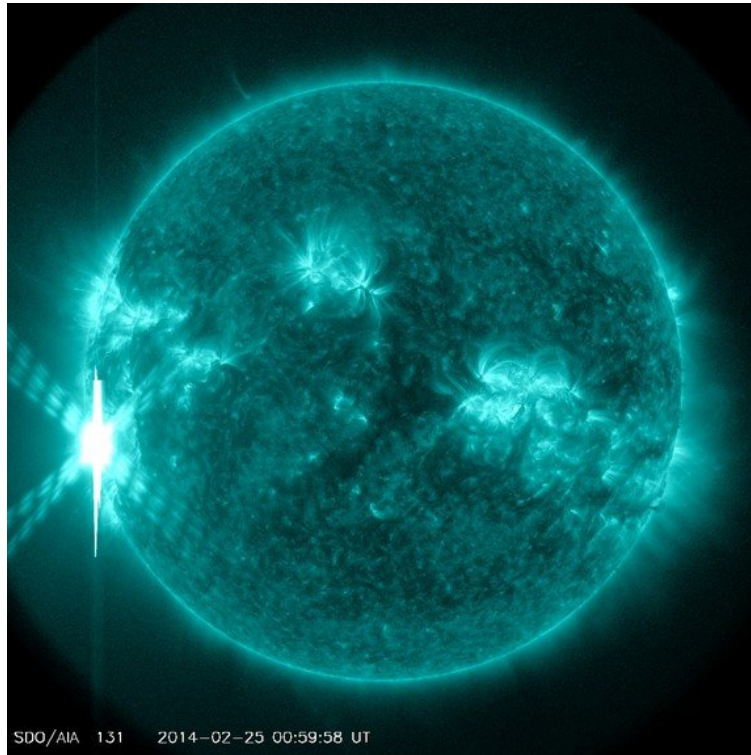


Figura 2.7: *Llamarada solar X4.9 captada el 25 de Febrero de 2014 por el Observatorio de Dinámica Solar de la NASA SDO* ⁸.

En conclusión es importante tener en cuenta que el Sol es un cuerpo térmico que puede emitir radiación en ondas de radio por medio de frenado magnético y también es un cuerpo no térmico capaz de emitir ondas de radio por medio del sincrotrón.

Mancha solar

En el siglo XVI, Galileo observó por primera vez por medio de un telescopio lo que él creía que era la superficie solar, encontrando que esta presentaba pequeños puntos de tonos más luminosos y otros más oscuros que contrastaban con la luminosidad del resto de la superficie solar. Con un telescopio óptico y con los filtros adecuados es posible observar la fotosfera solar, región sobre la cual se generan las Fácúlas (zonas de alta luminosidad) y las manchas solares (zonas de baja luminosidad). Estas últimas constan de dos regiones principales, una región muy oscura (umbra) rodeada por una segunda región mucho más clara (penumbra). Realmente las manchas solares no son tan oscuras como se pensaría, si de alguna manera se pudiese aislar una, esta brillaría tanto como la luna llena; la cuestión de su aparente

oscuridad radica en el contraste relativo entre la temperatura promedio de la fotosfera que se encuentra sobre los 6000°C , y la temperatura promedio de una mancha solar que es 1500°C menor. En la Figura 2.8 se muestra una fotografía de la fotosfera solar captada mediante observación directa desde el OAUTP con un telescopio, un filtro solar y una cámara. En esta imagen se aprecia un grupo de manchas solares como puntos oscuros que como se mencionó corresponden a zonas de menor temperatura y alta actividad magnética sobre la superficie solar.



Figura 2.8: *Mancha solar captada desde el OAUTP.*

Generalmente las llamaradas mencionadas en el apartado anterior, nacen en las manchas solares debido a que las fuerzas magnetohidrodinámicas son tan grandes que generan flujos magnéticos que van de un lado a otro llevando partículas y corrientes eléctricas que generan las condiciones necesarias para que se de una liberación repentina de grandes cantidades de energía en cuestión de minutos. Por otro lado, el número y posición de las manchas en el disco solar varía en función de algo conocido como período del ciclo solar, un período de 11 años aproximadamente, en el cual se presentan dos sucesos relevantes, el primero denominado máximo solar, que es cuando la cantidad de manchas solares y la actividad magnética es alta, mientras que el segundo suceso, denominado mínimo solar, corresponde al instante en

que el Sol presenta una cantidad de manchas solares y una actividad magnética baja. El seguimiento de la actividad solar se realiza calculando el número de Wolf (ecuación (2.7)), que relaciona el número total de grupos de manchas y el número total de manchas o focos individuales y mide el tamaño, la cantidad y periodicidad de las manchas solares. Cuando el número de Wolf es alto se tiene una mayor actividad solar.

$$R = k(10g + s) \quad (2.7)$$

Donde R representa el número de la mancha solar relativo, g es el número de grupos de manchas, s es el número de manchas individuales y k es un factor que depende de la instrumentación y del momento de observación. La observación y estudio de las manchas solares ha permitido la realización de importantes avances en física solar. Un ejemplo de esto fue el descubrimiento de la rotación diferencial que presenta el Sol, la cual consiste en que regiones cerca del ecuador solar tienen períodos de rotación de 25 días mientras que regiones cercanas a los polos presentan períodos de rotación de 28 días, esto es posible debido a que el Sol es un cuerpo gaseoso y la interacción del campo magnético y las fuerzas gravitatorias generan en él este tipo de fenómenos dinámicos.

El ciclo solar, la rotación diferencial y el campo magnético del Sol generan complejos fenómenos físicos ligados a emisiones electromagnéticas y a la creación de manchas solares. Al inicio del ciclo solar las líneas de campo magnético están ordenadas debido a la poca actividad magnética que se presenta gracias a la baja densidad de manchas solares, pero cuando las manchas solares aumentan, es decir, cerca al máximo solar, la actividad magnética se vuelve más compleja, lo cual sumado con la rotación diferencial hace que las líneas de campo magnético se retuerzan y enreden entre sí, forzando la creación de nuevos flujos magnéticos que dan como resultado la formación desordenada de más manchas solares sobre la fotosfera. Ahora, es claro que el flujo magnético debe ir de un lado a otro, y es por esta razón que las manchas solares se producen por pares (inicio y fin del flujo) [28]. Finalmente y de una manera más técnica, la disminución en la temperatura y la luminosidad en una mancha solar se debe a que las altas corrientes magnéticas disminuyen la presión y la densidad del gas solar (plasma) en las zonas donde se producen, y consecuentemente generan el escenario para la producción de otros fenómenos como las llamaradas solares o las eyecciones de masa coronaria que se tratan en siguiente apartado.

Eyección de masa coronaria

Las eyecciones de masa coronaria (EMC) son eventos altamente energéticos que se producen cuando las fuerzas que generan los campos magnéticos en las manchas solares son tan grandes que hacen que los arcos de flujo magnético que se forman entre una mancha y otra se rompan, haciendo que el plasma junto a las partículas solares sea expulsado a gran velocidad, venciendo la fuerza de atracción gravitatoria generada por la masa solar. Las EMC se producen en la superficie del Sol, específicamente en la corona solar, generando fenómenos que se reflejan directamente sobre el viento solar como ondas de choque, variaciones en la densidad del plasma, flujos bidireccionales de electrones y protones de baja energía a lo largo de las líneas de campo magnético y campos magnéticos de gran magnitud y con poca variación de su intensidad en el tiempo.

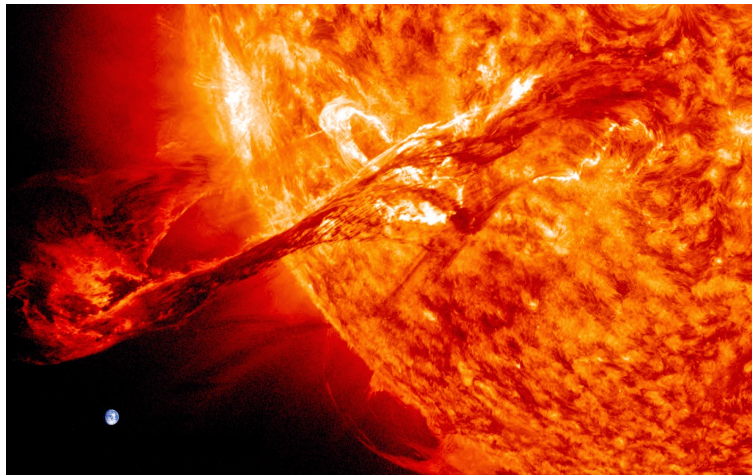


Figura 2.9: *Eyección de masa coronaria y comparación de su magnitud con el tamaño del planeta Tierra*⁹.

Toda esta dinámica un tanto caótica, esta definida en función de la interacción entre tres fuerzas fundamentales presentes en el Sol: La fuerza de Lorentz que aparece debido a la presencia de cargas eléctricas y campos electromagnéticos en todo el entorno solar, la fuerza de atracción gravitatoria generada por la enorme masa solar que interactúa con el material presente en la corona solar y con todos los elementos presentes en las corrientes eléctricas formadas por electrones, protones y cantidades pequeñas de moléculas más pesadas como helio, oxígeno e incluso hierro. La última y más importante de estas tres fuerzas es la denominada fuerza de arrastre generada por la interacción del material plasmático

⁹<http://todaunaamalgama.blogspot.com.co>

liberado en el medio interplanetario y el viento solar, siendo este último el encargado de direccionar y transportar la energía contenida por la explosión solar hacia diferentes lugares en el sistema solar, incluyendo la Tierra [29]. De esa manera es que el viento solar se convierte en protagonista dentro de la física que hace posible que la información contenida en las EMC llegue hasta la Tierra. La Figura 2.9 muestra un EMC real captada por el Observatorio Heliosférico y Solar (SOHO), comparada en magnitud con el tamaño del planeta Tierra, se aprecia el colosal tamaño que puede llegar a generar un fenómeno físico resultado de la interacción del campo magnético solar, las manchas solares y las grandes masas con altas temperaturas que emiten al medio exterior.

Viento solar

Existe una región del Sol que solo es apreciable durante un eclipse solar o mediante un coronógrafo, denominada corona solar. Es la capa más externa del Sol, compuesta principalmente de material plasmático y con un tamaño de un millón de kilómetros desde su origen sobre la cromósfera. El material presente en la corona solar es mucho más denso que el que se encuentra en la fotósfera y posee una temperatura de $10^6 K$, un plasma tan caliente como este no se queda confinado alrededor del Sol, sino que se extiende muchísimo más lejos, ya que la atracción gravitacional del Sol no es suficiente para contenerlo y este logra escapar hacia el espacio interplanetario, guiado por el campo magnético solar gracias a su alta energía cinética. La teoría dinámica de la extensión de la corona solar propuesta por E. N. Parker en los años 50 que planteaba que el material de la corona fluía hacia afuera del Sol de manera radial y continúa fue corroborada por las observaciones del satélite ruso Lunik III en 1959, con el cual se consiguió comprobar la existencia de un fenómeno que actualmente es conocido como viento solar, que es como Parker bautizó al continuo fluir del material plasmático en la corona solar hacia el medio interplanetario.

El viento solar es un flujo continuo de partículas cargadas emitidas por el Sol y que viajan por todo el sistema solar, con velocidades del orden de $800 km/s$ y con densidades del orden de $10^6 part./m^3$, llegando hasta aproximadamente 50-100 unidades astronómicas (UA) medidas radialmente desde el Sol hacia el exterior. Claramente, la actividad del viento solar es modulada por el ciclo solar, debilitándose en el mínimo solar y fortaleciéndose en el máximo solar. Esto se traduce en que durante el mínimo solar aumentan las probabilidades que entren en el Sistema Solar partículas energéticas extragalácticas debido a la disminución en la energía del viento solar circundante y que de alguna manera frena o detiene el acceso de dichas

partículas al interior del medio interplanetario, con la formación de una gigantesca estructura conocida como heliósfera, que es un especie de burbuja o espacio interestelar sobre la cual el viento solar tiene influencia. El viento solar también es el causante de otros fenómenos como las tormentas geomagnéticas¹⁰ que pueden afectar redes de energía en la Tierra, las auroras boreales y que el plasma de las colas de los cometas siempre apunte en dirección opuesta al Sol [30]. En la Figura 2.10 se muestra una imagen captada por sondas espaciales de NASA de la corona solar y la emisión de las líneas altamente ionizados de hierro para el eclipse del año 2008, donde claramente se aprecia la presencia y dirección del viento solar.

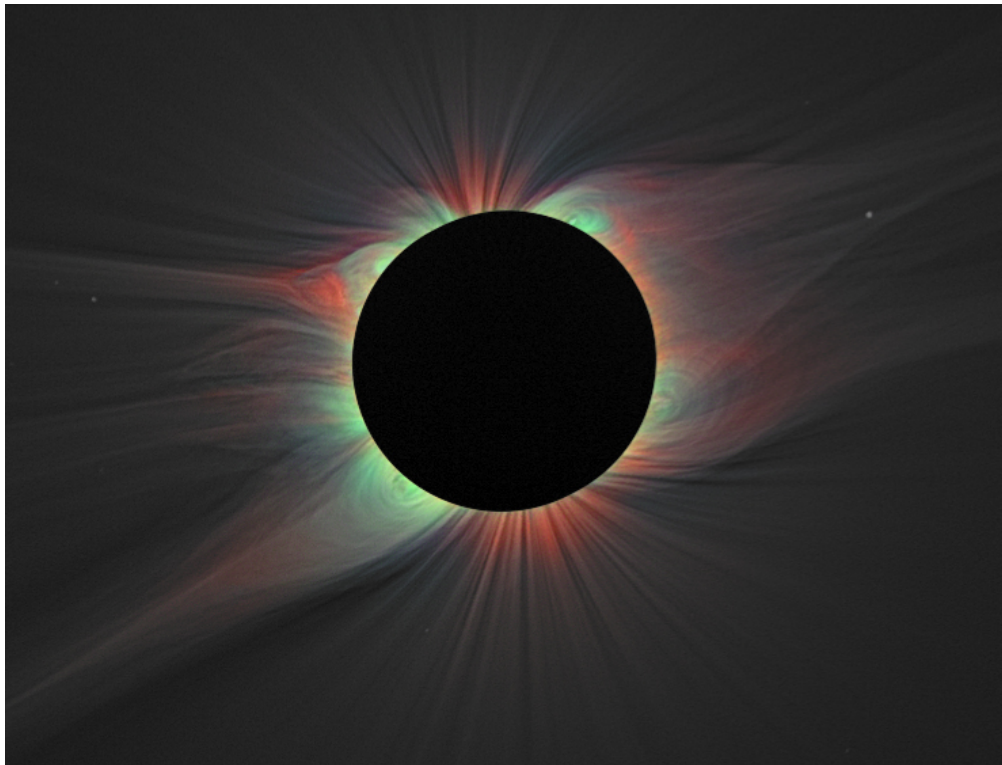


Figura 2.10: *Imágen de la corona solar captada por NASA donde se evidencia la presencia del viento solar y su dirección radial*¹¹.

Clasificación de las radio explosiones solares

Las radio explosiones solares alcanzan un enorme orden de frecuencias que van desde algunos pocos kilohertzios hasta algunos gigahertzios. En todo ese gran espectro de frecuencias se

¹⁰Perturbación momentánea de la magnetósfera terrestre

¹¹<http://www.nasa.gov/>

presentan cambios con sorprendente rapidez en un escala de tiempo medible en segundos. Esa naturaleza solar hace imposible un estudio punto a punto o una exploración pausada en alguna frecuencia particular.

Este comportamiento exige la implementación de un instrumento que proporcione una vista instantánea de toda esa escala de radio frecuencias. Dicho instrumento recibe el nombre de radioespectrógrafo, que es un radiotelescopio con barrido automático de frecuencias. Un radioespectrógrafo se compone por un receptor que se sintoniza repetidamente a través de un mismo ancho de banda de frecuencias definido y que realiza varios barridos por segundo. También cuenta con una antena cuya respuesta debe ser constante sobre ese mismo ancho de banda; todo esto con el objetivo de obtener un registro continuo y permanente de la intensidad solar en función de la frecuencia en cada instante. Tal registro es conocido como espectro dinámico solar y actualmente es quien define cada uno de los 5 tipos de radio explosiones solares que se muestran en la Apéndice A.2

2.3.2 Júpiter

En 1955 durante los meses de enero, febrero y marzo Burke y Franklin estudiaron al planeta Júpiter empleando el radiotelescopio Mills Cross de 22 Mc/s de la Institución Carnegie de Washington, convirtiendosen en los primeros radioastrónomos en descubrir las radioemisiones jovianas en 22.2 MHz, es decir, son los pioneros en el estudio de las REDJ [31].

Si bien el espectro de emisión de radio de Júpiter va desde 40 MHz a unos pocos kilohercios, las tormentas de radio fácilmente detectables desde la Tierra ocurren justo por encima de 15 MHz hasta un límite aproximado de 38 MHz, pero la ionósfera de la Tierra atenúa significativamente frecuencias por encima de 25 MHz y por debajo de 15 MHz, haciendo que el intervalo de frecuencias apropiado para observar a Júpiter sea entre 18 MHz y 23 MHz.

Este intervalo de frecuencias esta bien caracterizado y definido por dos tipos de radio señales distintas: Las ráfagas tipo L (Long) y las ráfagas tipo S (Short) que son dos manifestaciones diferentes de la actividad joviana en longitudes de onda decamétricas. Para las ráfagas tipo L, una de las características más representativa es que la variación de su intensidad en el tiempo es lenta y por lo general presentan una duración de alrededor de unos pocos a unas decenas de segundos, con un ancho de banda instantáneo de unos pocos megahertz. Para las ráfagas tipo S se caracterizan por ser mucho más cortas en duración y por tener un ancho de banda de algunas decenas de kilohertz, presentando cientos de explosiones por segundo.

Pero la característica que diferencia radicalmente ambos tipos de señales es el parámetro denominado tasa de deriva de frecuencia (f_d), que establece cuanto varía la frecuencia en función del tiempo y que es diferente para las ráfagas L y S. En la Figura 2.11 se muestra el comportamiento de las frecuencias emitidas en función del tiempo [32].

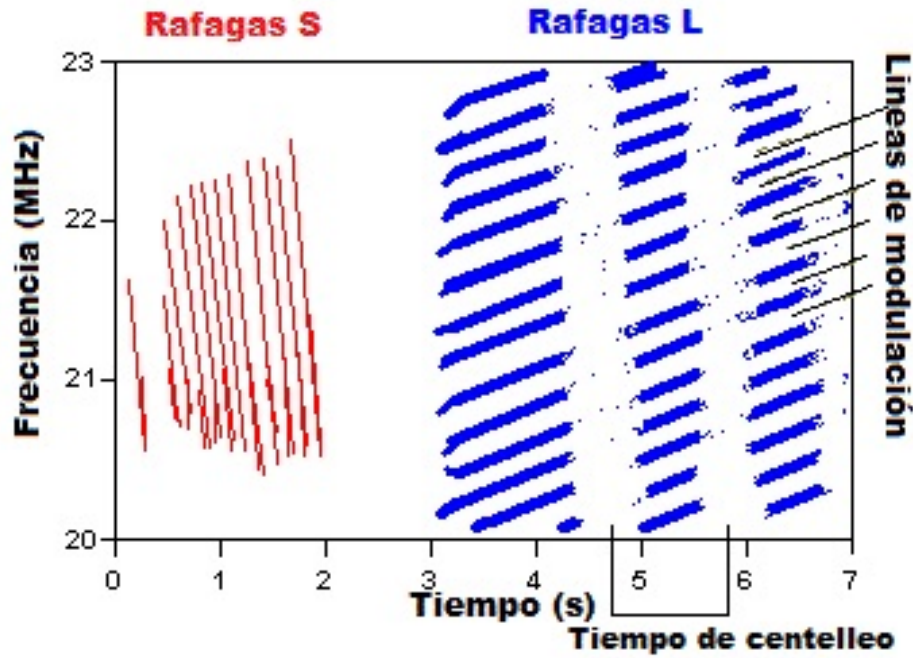


Figura 2.11: *Comportamiento de las frecuencias emitidas en función del tiempo para ráfagas L y S¹².*

- **Tasa de deriva de frecuencia para ráfagas tipo L:** Para las ráfagas L este parámetro se relaciona con complejos efectos geométricos asociados a mecanismos de emisión de ciclotrón máser que en conjunto con el medio interplanetario y la ionósfera generan efectos de centelleo y modulan la emisión con una frecuencia de $\pm 100 \text{ KHz/s}$.
- **Tasa de deriva de frecuencia para ráfagas tipo S:** Para las ráfagas S este parámetro se debe al hecho de que las partículas cargadas con origen en Júpiter, se ven impulsadas progresivamente a través de las líneas espirales de campo magnético joviano hacia regiones de menos intensidad magnética. En este caso, la frecuencia de ciclotrón es directamente proporcional a la intensidad de campo magnético y de allí es que una

¹²Fuente: <http://www.spaceacademy.net.au/spacelab/projects/jovrad/jovrad.htm>

variación en intensidad de campo magnético se refleja en un cambio en la frecuencia de emisión; finalmente a una frecuencia de 20 MHz se tiene una frecuencia de deriva de -20MHz/s , donde el signo menos significa que se pasa de una frecuencia alta a una frecuencia baja.

Aunque la clasificación anterior para las emisiones jovianas es general y acoge todas las radio señales procedentes de la magnetósfera de Júpiter, existe otro tipo de clasificación que deja de lado la fenomenología física de generación de dichas señales y toma en cuenta la ubicación de la radiofuente particular que emite la señal, dichas fuentes reciben los nombres de radiofuentes A, B y C en el caso de que solo dependan de Júpiter, y radiofuentes Io-A, Io-B e Io-C para el caso en que dependen tanto de Júpiter como también de la interacción de este con el satélite galileano Io [33]. La probabilidad de ocurrencia de cada una de estas emisiones está ligada a parámetros tales como la posición relativa entre Júpiter y la Tierra y la orientación del campo magnético joviano, esto para el caso de las fuentes no dependientes de Io. Por otro lado para las fuentes dependientes del sistema Io-Júpiter se tienen en cuenta estos mismos parámetros con uno adicional que es la posición relativa entre Io y Júpiter.

De una manera más técnica los tres parámetros mencionados antes reciben en radioastronomía los nombres de longitud del meridiano central joviano (CML), la fase de Io (αIo) y finalmente la declinación joviocéntrica de la Tierra (DJT). El CML corresponde al valor de la longitud de Júpiter medido en el sistema de referencia III¹³, αIo corresponde al ángulo que posee en determinado instante la luna Io con respecto a la conjunción geocéntrica superior¹⁴, y por último DJT corresponde al ángulo de declinación de la Tierra con respecto a Júpiter. La combinación de estos tres parámetros es lo que establece de qué radiofuente particular se recibe en la Tierra determinada emisión de radio ondas, de tal forma que en el Apéndice A.1 se establecen conjuntos de intervalos angulares que corresponden a cada una de las fuentes mencionadas anteriormente [34].

Mecanismo de generación de radio ondas

Dentro del sistema solar, Júpiter es el único planeta que emite ondas de radio en varias frecuencias y que son detectables desde el planeta Tierra. Los mecanismos de generación de dichas ondas de radio son atribuidos a Júpiter o al sistema Io-Júpiter. Estas emisiones

¹³Sistema de referencia basado en el campo magnético de Júpiter

¹⁴Punto posterior de intersección entre la línea que une a la Tierra y a Júpiter y la órbita de la luna Io alrededor de Júpiter

se describen en términos de un cono imaginario que posee su eje paralelo a las líneas del CMJ donde se origina la emisión, es decir, cerca de los polos magnéticos de Júpiter. El ángulo de apertura del cono es de 75 grados aproximadamente y cuando las paredes de este cono se cruzan en la dirección hacia la Tierra, se emite un rayo hacia esta el cual hace que las ondas de radio se registren con mayor intensidad. Por otro lado, debido al movimiento de rotación joviano y a las partículas cargadas emitidas por Io y atrapadas por la línea de campo magnético particular que se encuentre sobre el cono, se crea otra estructura denominada el tubo de flujo magnético de Io, que es una zona de flujo magnético con una mayor densidad de partículas cargadas, la cual se ve energizada cuando se activa algunas de las radiofuentes mencionadas anteriormente. En la Figura 2.12 se aprecia de una manera más clara la geometría de toda esta estructura. A continuación se explican los mecanismos particulares de emisión de ondas de radio para Júpiter y el sistema Io-Júpiter [35].

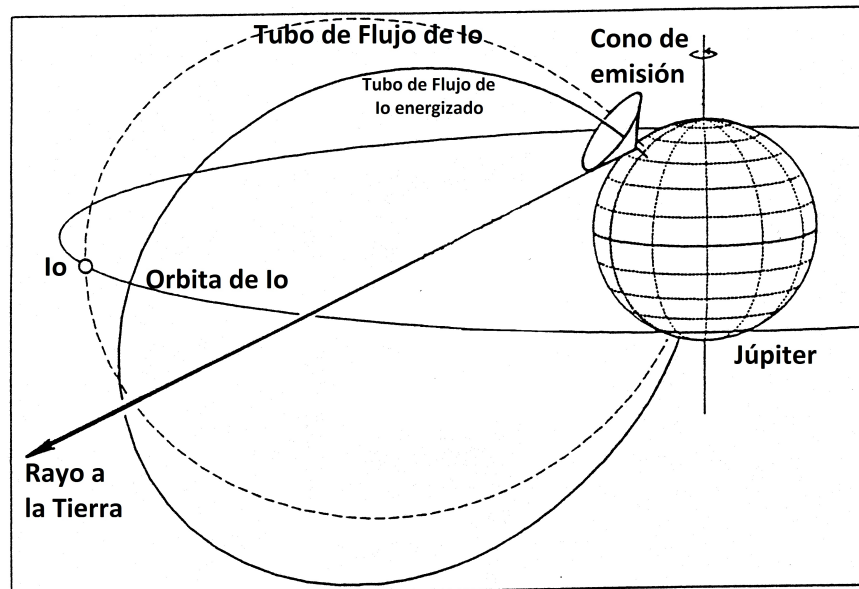


Figura 2.12: Geometría del sistema Io-Júpiter y el cono de emisión hacia la Tierra.

- **Fuentes dependientes de Júpiter:** El campo magnético joviano (CMJ) es una de las estructuras de mayor tamaño en el sistema solar, es 8 veces más intenso que el campo magnético de la Tierra y se extiende en dirección al Sol una distancia entre 3 y 6 millones de kilómetros y en dirección opuesta casi hasta Saturno tal como se observa en la Figura 2.13. Debido a esa gran magnitud, está en capacidad de recoger partículas cargadas de su entorno y conducir las a través de las líneas de campo magnético hacia las regiones polares del planeta, generando un flujo eléctrico con potencias cercanas a

los 40 billones de Watts, que producen auroras e impresionantes emisiones de radiación electromagnética del tipo ondas de radio hacia el espacio exterior [36].

Dichas ondas de radio pueden ser generadas por dos mecanismos conocidos como sincrotrón y ciclotrón, los cuales pueden producir ondas electromagnéticas sin necesidad de que exista colisión entre partículas. Este fenómeno se produce por la aparición de la fuerza de Lorentz (ecuación (2.8)) sobre las partículas cargadas no relativistas (para el caso de sincrotrón) o partículas relativistas (para el caso de ciclotrón), atrapadas por el CMJ, el cual las acelera y genera la denominada radiación de sincrotrón-ciclotrón, que dependiendo de los valores de la intensidad de campo eléctrico, campo magnético, de la velocidad y la carga de la partícula puede generar desde ondas de radio hasta rayos X o rayos gamma [37].

$$\vec{f} = q(\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (2.8)$$

- **Fuentes dependientes del sistema Io-Júpiter:** El satélite galileano Io, es la luna más cercana al planeta Júpiter y es aparte de la Tierra, el único cuerpo del sistema solar en el cual se ha confirmado actividad volcánica. Dicho vulcanismo es generado por las intensas fuerzas de marea¹⁵ generadas por la gravedad de Júpiter y las lunas Europa y Ganímedes, que comprimen y expanden a Io y ocasionan enormes erupciones volcánicas, dando como resultado gas eléctricamente conductivo que alimenta el flujo de partículas cargadas sobre las líneas de campo magnético joviano mencionado en el apartado anterior. Estas erupciones volcánicas en conjunto con el movimiento de traslación de Io sobre su órbita crean un toroide de partículas cargadas alrededor de Júpiter conocido como el toro de Io (Figura 2.13), que es el responsable de la emisión de las denominadas ondas Alfvén (ondas de energía electrodinámica). Esta estructura está compuesta por azufre, oxígeno y formas gaseosas de elementos como el sodio, expulsados o arrancados de Io por las energéticas partículas de la magnetósfera joviana que bombardean su superficie. Dichas partículas se calientan hasta 100000 K, produciendo radiación que puede observarse desde la Tierra, especialmente la luz amarilla del sodio. El movimiento de traslación de Io no solo genera ese cinturón toroidal que se mencionaba antes, sino que también hace que Io adquiera una diferencia de potencial enorme, capaz de producir corrientes de 10 millones de amperios, que fluyen a lo largo

¹⁵Efecto secundario de la fuerza de gravedad de cuerpos celestes muy masivos sobre otros cuerpos de menor masa. Para el caso de Io estas fuerzas son inmensas comparadas con las que ejerce la luna sobre la Tierra.

de un tubo de flujo magnético que se forma entre Io y la parte superior de la atmósfera de Júpiter.

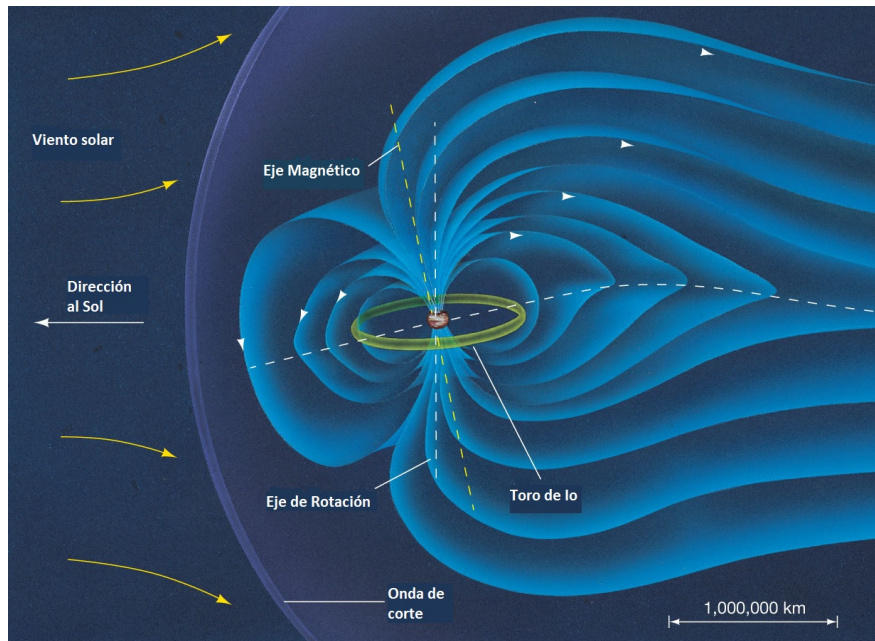


Figura 2.13: *Representación del campo magnético joviano y el toro de Io*¹⁶.

A medida que el planeta gira, dicho tubo traza un especie de sendero de partículas sobre la atmósfera joviana, el cual a su vez contribuye en la generación de radiación electromagnética [38]. En este caso al igual que para las fuentes dependientes de Júpiter, el mecanismo de generación de las radio ondas del sistema Io-Júpiter se produce por sincrotrón o ciclotrón dependiendo de que tipo de partículas consiga atrapar el CMJ.

El Sol y el planeta Júpiter, como se apreció, son dos de las muchas radiofuentes que existen en el universo, la característica más destacable de ellas es su cercanía con el planeta Tierra, esto hace menos complejo su estudio debido a que las distancias que deben recorrer las ondas electromagnéticas es relativamente poca, lo cual ha hecho que el estudio e información de la actividad solar y joviana sea bastante amplio y bien definido. Sin embargo existen otras radiofuentes con características aún más fascinantes y que se encuentran a años luz de distancias de la Tierra, pero que gracias al avance en radioastronomía ha sido posible estudiarlas, dichas radiofuentes se describirán en el apartado de núcleos activos de galaxias y estrellas de neutrones.

¹⁶Fuente: http://www.quazoo.com/q/Magnetosphere_of_Jupiter

Condiciones óptimas de observación

Existen intervalos temporales donde se tiene determinada probabilidad de ocurrencia de emisión de radio ondas de una u otra fuente joviana, así como tambien pueden existir periodos donde no haya ninguna probabilidad de un evento en radio frecuencia. Gracias al software Radio Jupiter Pro, es posible determinar en que momentos existe la probabilidad de ocurrencia de eventos y en que momentos no, y determinar también que radio fuentes los pueden producir; de modo que sea fácil programar jornadas de observación por intervalos de tiempo que oscilan entre varios minutos hasta algunas horas, y de esa manera obtener registros cortos con información relevante sobre las radiofuentes y evitar registros robustos con datos poco importantes.

Claramente, para recibir desde la Tierra las ondas de radio que se generan en Júpiter, este último debe estar sobre la boveda celeste visible para determinado observador, puesto que debido al movimiento de traslación de Júpiter sobre el Sol y a los movimientos naturales de la Tierra, se presentarán periodos donde será posible observarlo (de noche) y otros periodos donde la luz y las emisiones solares opacarán la actividad joviana y no será posible observarlo (de día). De allí que la principal condición para un registro óptimo de las REDJ, es que Júpiter se encuentre sobre la bovedad celeste nocturna lejos de la interferencia de las emisiones solares.

Teniendo esto en cuenta, se define que las mejores condiciones de observación de las radiofuentes jovianas se generan entre las 00:00 y las 6:00, puesto que la ionósfera terrestre se vuelve más transparente debido a la repolarización que presenta en horas de la madrugada, con lo cual la cantidad de interferencia que se registra en la antena es mucho menor. Por otro lado, la interferencia generada por el ruido de la actividad humana (redes eléctricas, computadores, dispositivos electrónicos, etc), es mucho menor en este intervalo de tiempo. Las fuertes tormentas eléctricas son una fuente importante de interferencia sobre las antenas comunes para estudiar a Júpiter (antenas dipolo), y aunque en este proyecto se haya implementado una antena magnética inmune al ruido eléctrico, siempre es mejor prevenir daños sobre el receptor y no tomar registros durante estas tormentas.

Como se ha mencionado con anterioridad, las emisiones jovianas son de banda ancha y se pueden registrar en cualquier lugar sobre la frecuencia de operación del receptor, de tal forma que es necesario no modificar el dial de frecuencia durante una jornada de observación para garantizar una óptima adquisición de datos.

2.3.3 Núcleos activos de galaxias y estrellas de neutrones

Núcleos activos de galaxias

En el universo visible se conocen una gran cantidad de cuerpos celestes con características asombrosas, uno de los más destacables por su gran intensidad lumínica son los denominados núcleos activos de galaxias (NAG) o AGN's de su nombre en inglés Active Galaxy Nucleus. Estos objetos, son los más brillantes en todo el universo conocido y se caracterizan por ser uno de los que emiten mayor cantidad de radioemisiones hacia el espacio. Son un gran conglomerado de gas, polvo galáctico y una alta densidad estelar concentrada en una región de un tamaño comparable al tamaño del sistema solar. Los NAG emiten una gran cantidad de radiación no estelar, más que la que puede llegar a emitir el resto de estrellas de la galaxia a la que pertenece, es decir, hay una fuente de energía distinta a la termonuclear de las estrellas, una energía que proviene de la región central de la galaxia y que emite desde luz visible, luz infrarroja y ondas de radio, hasta rayos x y rayos gamma, a esa región se le conoce como disco de acreción.

Actualmente se tienen evidencias científicas de que lo que hay en el centro de las galaxias activas es un agujero negro, un cuerpo celeste tan supremamente masivo que ni siquiera la luz puede escapar de él, un objeto con miles de millones de veces la masa del Sol comprimido en un diámetro menor a una unidad astronómica¹⁷ y con la capacidad de hacer que miles de millones de estrellas ubicadas a miles de años de luz de distancia se muevan bajo la acción de su fuerza gravitatoria. Un objeto como estos no es observable directamente por ningún telescopio, puesto que su gravedad curva tanto el espacio que ningún tipo de radiación puede escapar de él. Su existencia se argumenta de manera indirecta, debido a que las estrellas que están más cerca del centro de la galaxia describen orbitas muy bien definidas alrededor de un cuerpo invisible (no observable). La velocidad de rotación y el periodo orbital de dichas estrellas da indicios sobre las características que debería tener el objeto central. Para el caso de la Vía Láctea, el Observatorio Europeo Austral en un estudio realizado desde el año 1992 hasta el año 2007 con el telescopio VLT (Very Large Telescope), encontró que en el centro galáctico, según el movimiento de las estrellas más cercanas, debe haber un cuerpo con una masa que corresponde a tres mil millones de veces la masa del Sol y con un radio de 0.3UA, aproximadamente. El agujero negro súper masivo que se encuentra en el centro galáctico no es el responsable directo de las emisiones electromagnéticas que producen los NAG, dichas radiaciones son producto del conglomerado en conjunto que circunda el agujero negro, las

¹⁷Distancia media entre la Tierra y el Sol, aproximadamente 149.597.870.700 metros

enormes fuerzas gravitatorias, altas temperaturas, un medio muy denso con polvo, gas y estrellas y una alta concentración de partículas cargadas que generan el escenario para que las NAG sean los objetos más brillantes del cielo no solo en radio sino también en luz visible y rayos x .

A pesar de que en el centro de la Vía Láctea hay presencia de una agujero negro, esta galaxia no posee un núcleo activo debido a que las emisiones electromagnéticas que provienen de ella no son lo suficientemente energéticas, de modo que el NAG más cercano a la Tierra pasa a ser el que posee la galaxia Virgo A o Messier 87 (M87). En la Figura 2.14 se muestran dos imágenes de la galaxia M87, una obtenida con el radiotelescopio LOFAR y otra con el telescopio óptico SDSS.

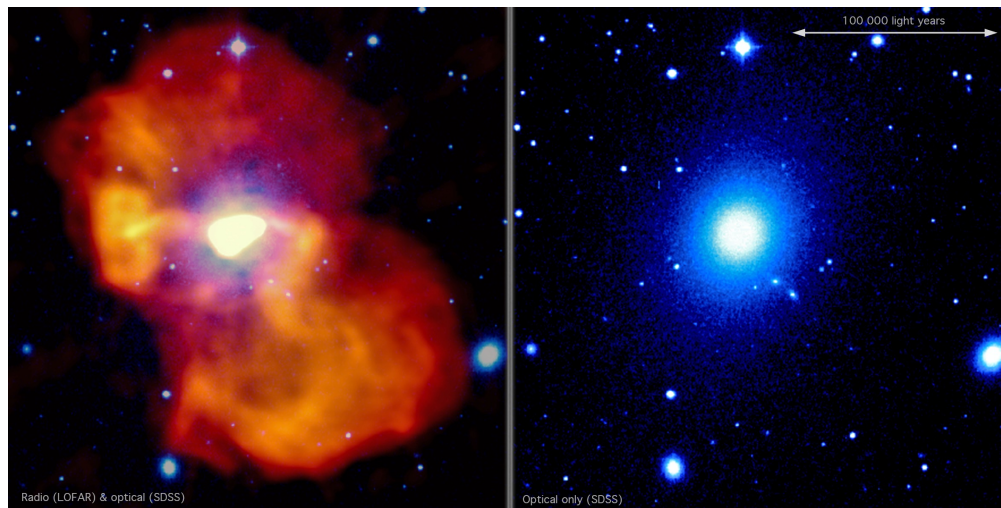


Figura 2.14: *Imágenes de la galaxia con núcleo activo M87. Izquierda: Imagen compuesta por datos del radiotelescopio LOFAR y el telescopio óptico SDSS. Derecha: Imagen con datos del telescopio óptico SDSS. Se puede apreciar que M87 es mucho más brillante y grande en radio que en el visible¹⁸.*

Las NAG se clasifican en tres grandes clases: Galaxias Seyfert, Radiogalaxias y Cuasáres. Las galaxias Seyfert tiene características similares a las galaxias espirales, la única diferencia es que las Seyfert son en promedio tres veces mas brillantes que estas. Las Radiogalaxias, como su nombre lo indica, son galaxias que poseen una gran componente de emisión en radiofrecuencia, la cual opaca las demas emisiones que pueda generar dicha galaxia. Finalmente, los Cuásares, son objetos que en el espectro visible guardan semejanza con un estrella

¹⁸Fuente: <http://www.sci-news.com/astromy/article00688.html>

común, pero en realidad son galaxias que por el mismo hecho de encontrarse tan lejos de la Tierra, se les ve como si fuesen una estrella, de allí que sean de los objetos mas brillantes del universo en el rango óptico [39]. Es claro que las NAG son objetos de bastante interes en radioastronomía, debido a que permiten estudiar la estructura de galaxias lejanas, evidenciar la existencia de agujeros negros en los centros galácticos y contribuir a la investigación sobre la formación y evolución del universo; pero existe otro cuerpo aún mas enigmático y asombroso que los NAG, un cuerpo celeste muy estudiado por la comunidad radioastronómica debido a sus características especiales, dicho objeto recibe el nombre de estrella de neutrones y se tratará en la siguiente sección.

Estrellas de neutrones

Existen en el universo una cantidad enorme de estrellas, cada una de ellas con un ciclo de vida característico determinado por la masa inicial al momento de su formación. Un ejemplo de ello son las estrellas más masivas del cosmos, la evolución de este tipo de estrellas concluye con la formación de cuerpos relativamente pequeños (con un diámetro menor a 25 km) y con una densidad comparable a la densidad de un núcleo atómico de $3 \times 10^{17} kg/m^3$, lo cual genera fuerzas gravitacionales enormes en el entorno de la estrella. Este tipo de objetos recibe el nombre de estrellas de neutrones y son los cuerpos celestes observables más parecidos a los agujeros negros que existen en el universo. Dependiendo de ciertas condiciones geométricas se pueden convertir en los denominados Pulsares, que son otra importante fuente emisora de radio ondas conocida por la comunidad astronómica. Las estrellas de neutrones nacen como resultado del colapso gravitacional de una estrella gigante masiva y se le considera una de las más interesantes fuentes de estudio estelar, debido a que brindan información acerca de la vida temprana del universo al igual que de la formación y evolución del universo actual.

Durante su formación, las estrellas de neutrones heredan dos propiedades fundamentales de la estrella original, generando así dos de las características más impresionantes en todo el universo y de las más interesantes para la comunidad radioastronómica: Una velocidad de rotación enorme y un campo magnético muy intenso. Primero, como consecuencia de la conservación del momento angular, se presenta un aumento en la velocidad de rotación de la estrella a causa de la fuerte compresión a la que está siendo sometido su núcleo, alcanzando velocidades de hasta 46.000 revoluciones por minuto, es decir, cientos e incluso miles de giros por segundo sobre su propio eje. Segundo, de esa misma forma y debido a la conservación del flujo magnético, la estrella de neutrones genera los campos magnéticos más intensos que

se conocen en la naturaleza, con valores típicos de 10 billones de Gauss, que si se les compara con los 50 Gauss del campo magnético solar, son valores increíbles.

Este campo magnético, aparte de ser el responsable de que la estrella no se destruya debido a su alta velocidad de giro, es también el responsable de las radioemisiones que ella produce. Los electrones en la superficie de la estrella fluyen por acción de dicho campo hacia los polos magnéticos de la estrella de neutrones, luego son acelerados y producen radiación de sincrotrón que sale en dirección paralela al eje de rotación magnético. Finalmente, debido al rápido movimiento de la estrella sobre sí misma, las ondas electromagnéticas son enviadas hacia el espacio tal como si provinieran de un faro, cuya luz es posible ver únicamente si se está alineado con la dirección de emisión. Desde la Tierra, se registra esta radiación como pulsos de la misma frecuencia de rotación de la estrella, de allí que las estrellas de neutrones que tienen su dirección de emisión alineada con la Tierra reciban el nombre de Pulsares¹⁹, en la Figura 2.15 se presenta de manera esquemática la geometría de un Pulsar [40].

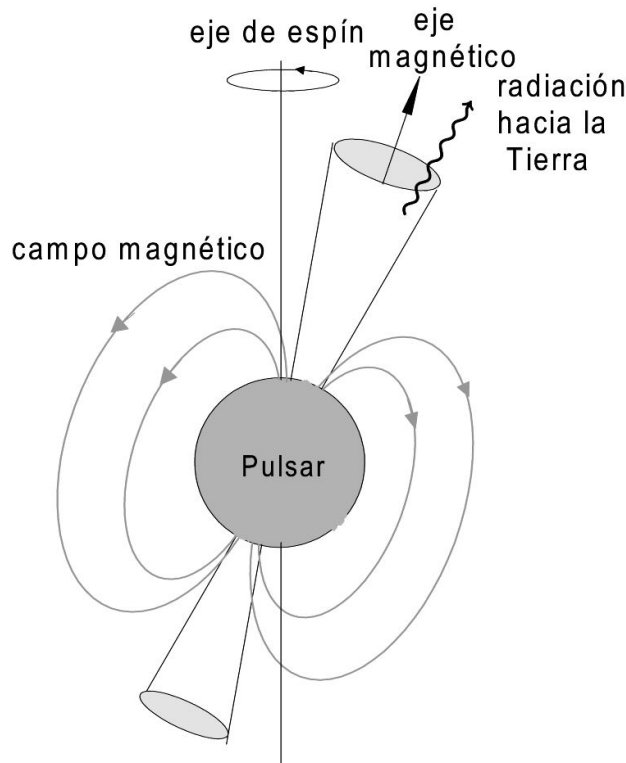


Figura 2.15: Esquema Geométrico de un Pulsar y la dirección de emisión hacia la Tierra.

¹⁹Todos los pulsares son estrellas de neutrones, pero no todas las estrellas de neutrones son pulsares.

Uno de los ejemplos más destacables de este tipo de objetos celestes es el denominado Pulsar del Cangrejo (PSR B0531+21), ubicado a 6.000 años luz de distancia de la Tierra en la región central de la Nebulosa del Cangrejo, es una estrella de neutrones que fue descubierta por radioastrónomos en 1969, con un diámetro aproximado 25 Km, un periodo de rotación de 33 ms por giro, con 1.4 veces la masa del Sol y que emite la mayor parte su radiación en forma de ondas de radio, pero también emite rayos X, rayos Gamma y luz visible.

Capítulo 3

Desarrollo del Sistema

Como se mencionó con anterioridad, un radiotelescopio es un instrumento utilizado en radioastronomía para captar y registrar la intensidad de las radio ondas emitidas de radiofuentes del espacio exterior, también puede determinar la posición de dichas radiofuentes en la bóveda celeste. Este tipo de instrumentos consta de tres partes fundamentales: El receptor de ondas, la antena receptora y el software. A continuación se presenta la descripción de cada una de las partes que se emplearon en la realización del presente proyecto, su construcción, características y puesta a punto. En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de bloques particular para este radiotelescopio.

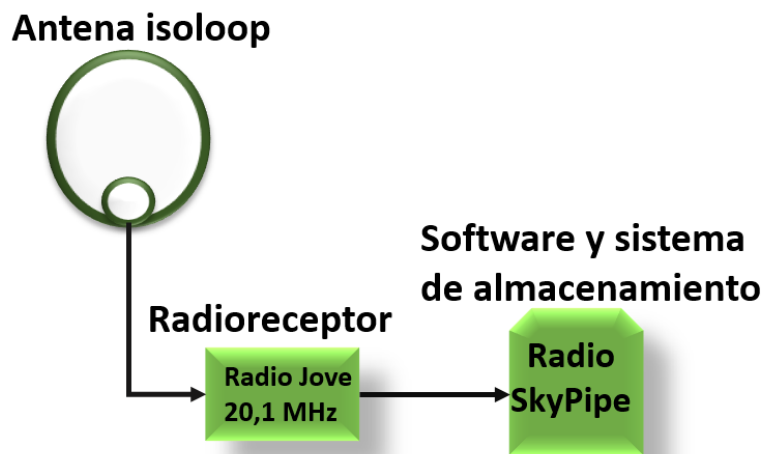


Figura 3.1: Diagrama de bloques del radiotelescopio desarrollado en el OAUTP.

3.1 La antena

3.1.1 Construcción y puesta a punto

La antena se construyó a partir de los datos teóricos calculados con las ecuaciones electromagnéticas para el diseño de una antena circular, fueron necesarios 3 m de tubo de cobre de 1,2 cm de grosor para el caso del lazo secundario, 60 cm de alambre de cobre desnudo calibre número 12 para el lazo primario, un capacitor variable de 10-200 pF configurado en 28 pF, y cable coaxial RG-59 para la comunicación con el receptor. Para el diseño, la frecuencia máxima de trabajo es de 30 MHz, de tal forma que es posible sintonizar la antena en 20.1 MHz y, con un acople $\lambda/4$, se obtiene que la longitud total del lazo secundario es de 2.5 m [21]. A partir de estos valores y empleando el grupo de ecuaciones (2.2) a (2.5), se consiguió determinar todo un conjunto de parámetros que caracterizan la antena diseñada. Estos parámetros se observan en la Tabla 3.1 y gracias a ellos fue posible toda la descripción física y electromagnética de la antena.

Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia de pérdida	200	m Ω
Potencia RF	1.0	W
Ancho de banda	64.94	KHz
Eficiencia	35.67	%
Área del lazo	0.50	m ²
Resistencia de radiación	162.81	m Ω
Resistencia total de pérdida	293.64	m Ω
Circunferencia del lazo	2.51	m
Porcentaje de longitud de onda	16.88	%
Inductancia del lazo	2.23	μ H
Capacitancia distribuida	6.77	pF
Factor de calidad (Q)	309.51	–
Capacitor de ajuste	28.02	pF
Voltaje del capacitor	295.72	V
Frecuencia: 20.1 MHz		
Diámetro del lazo: 0.8 m		
Diámetro del conductor: 12 mm		

Tabla 3.1: Parámetros físicos y eléctricos de la antena isoloop diseñada.

De manera consecuente, se obtuvo que el valor de los diámetros para la construcción inicial de la antena correspondían a 16 cm y 80 cm para los lazos primario y secundario, respectivamente. Pero al realizar las pruebas experimentales y obtener los datos deseados, como el valor de capacitancia y la ganancia en la respuesta en frecuencia, se encontró que no coincidían con los valores teóricos esperados, llegando a la conclusión de que era necesario cambiar los diámetros anteriormente calculados al igual que el valor de la capacitancia, con la intención de aumentar la ganancia y ubicar de manera correcta la respuesta en frecuencia de la antena. Por este motivo se construyó una segunda antena, pero esta vez atendiendo a la perspectiva experimental, definiendo que los diámetros finales para los lazos secundario y primario debían ser 90 cm y 18 cm respectivamente, y que el valor de la capacitancia donde se obtiene la mayor ganancia en la respuesta en frecuencia era de 19pF. En la Figura 3.2 se presenta el aspecto final de la antena construida.



Figura 3.2: Antena magnética circular diseñada en el proyecto e instalada en el OAUTP.

3.1.2 Simulación y análisis

Para el cálculo de la eficiencia y el ancho de banda se adelantó la simulación de la antena diseñada en el software Small Magnetic Loop Calculator V.1.22A, desarrollado por Steve Yates [41]. Tal como se observa en la Figura 3.3, para una frecuencia de operación de 20.1 MHz se obtiene una eficiencia de -4.5 dB, con un ancho de banda de 60 kHz.

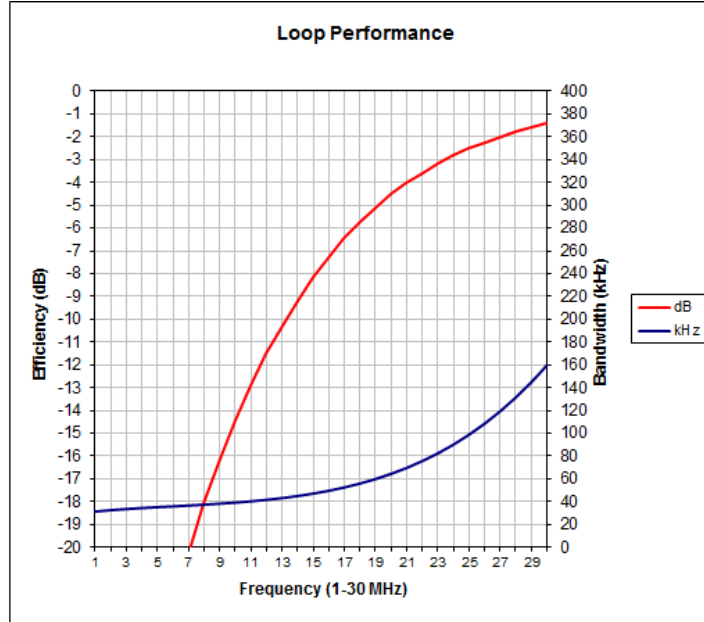


Figura 3.3: Curva de eficiencia y ancho de banda de la antena en función de la frecuencia de operación (20.1 MHz).

Así mismo, mediante el software 4Nec2 de Arie Voors [42], se obtuvieron los patrones de radiación en 3 y 2 dimensiones tanto para el plano horizontal como para el vertical. El resultado de esta simulación se presenta en la Figura 3.4, en la que se observa un patrón de radiación muy similar al de la antena dipolo, bidireccional en el plano horizontal y omnidireccional en el vertical, lo cual permite concluir que para la toma de los registros la antena se debe ubicar paralela al desplazamiento de Júpiter o del Sol, y sin necesidad de adelantar el seguimiento en el tránsito a través de la bóveda celeste a lo largo de la jornada de observación. Finalmente, la Figura 3.5 presenta el comportamiento descrito anteriormente a través de un patrón de radiación tridimensional en el que se identifica que la máxima ganancia de la antena se alcanza en dirección paralela a la misma, y que posee un valor máximo de 12.5 dB. La Figura 3.6 resume los parámetros de diseño y respuesta electromagnética implementados en el desarrollo y puesta a punto de la antena de 90 cm.

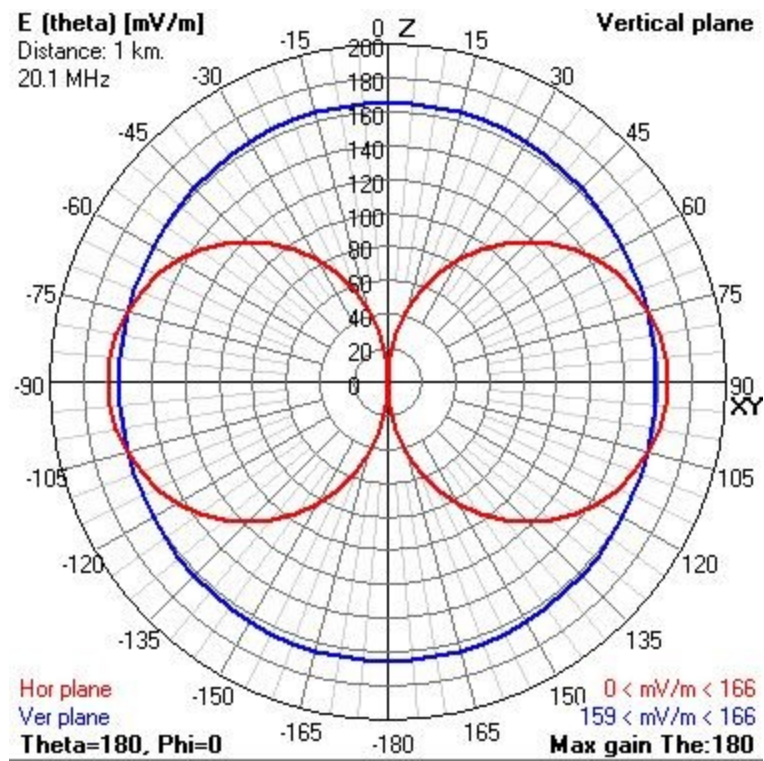


Figura 3.4: Patrones de radiación en 2D para los planos horizontal (rojo) y vertical (azul).

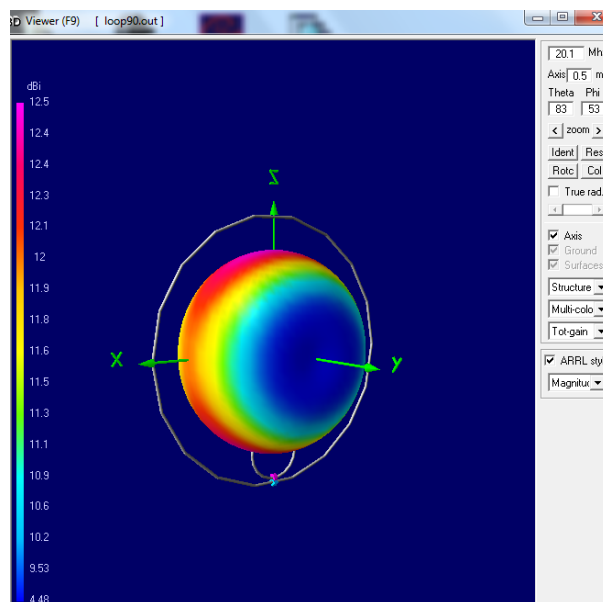


Figura 3.5: Patrón de radiación tridimensional. Nótese que la máxima ganancia se alcanza en la dirección paralela a la antena.

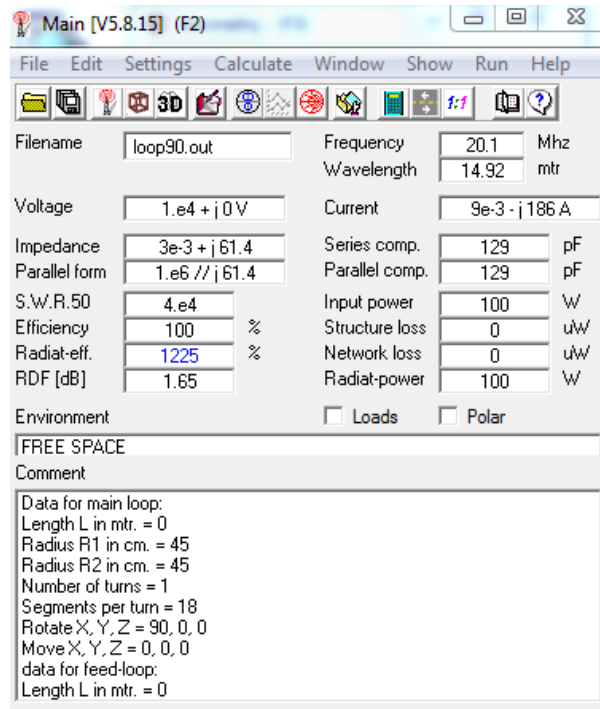


Figura 3.6: Parámetros de diseño y respuesta electromagnética de la antena isoloop de 90 cm de diámetro.

3.1.3 Pruebas experimentales

Una vez construida la antena (Figura 3.2) se procedió a medir su patrón de radiación mediante el módulo de Cassy Lab, el cual emite una señal senoidal hacia una plataforma rotacional sobre la que se ubica la antena de prueba. La Figura 3.7 muestra el montaje experimental realizado y la Figura 3.8 presenta los resultados obtenidos.

La circunferencia en color verde corresponde a la señal recibida por el sistema sin la antena (en vacío). Posteriormente se instaló la antena isoloop de forma fija y de frente a la fuente y se midió el patrón de radiación, obteniéndose como resultado la curva en color rojo. A continuación, manteniendo la antena fija y ubicándola paralela a la fuente, se obtuvo el patrón representado por la circunferencia azul. Finalmente, activando la rotación de la antena a través de la plataforma del módulo se obtuvo el patrón indicado en línea negra continua. En esta gráfica, se observa que la ganancia de la antena permanece entre -30 y -35 dB a lo largo de toda la circunferencia, lo que confirma el comportamiento omnidireccional de la antena desarrollada.

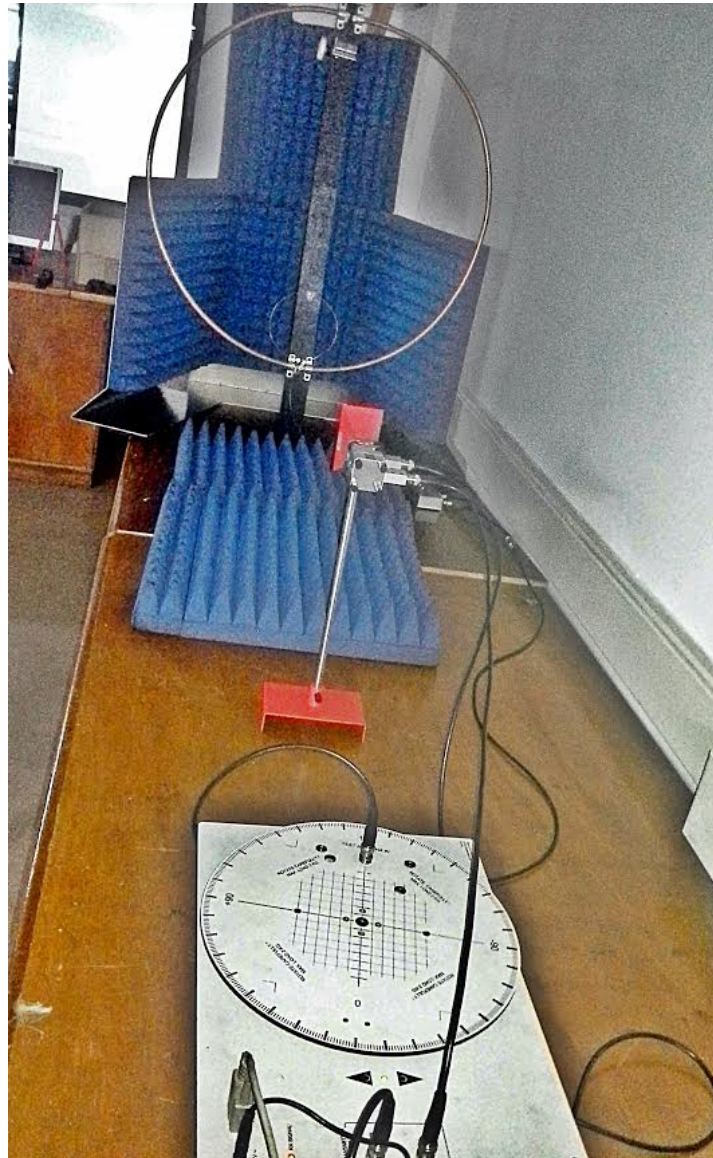


Figura 3.7: Montaje experimental realizado en el laboratorio para obtener los patrones de radiación de la antena con el modulo Cassy Lab.

Mediante el analizador de espectro MSA700 se identificaron las señales recibidas por la antena, de tal forma que al ajustar el capacitor de sintonización al valor especificado por el diseño, la resonancia de la antena se situó en 14 MHz, con una alta ganancia en 20.1 MHz, frecuencia en la que se registraron las señales provenientes del planeta Júpiter y del Sol. En la Figura 3.9 se observa el resultado obtenido con el analizador de espectro, donde son claros los picos en frecuencia correspondientes a la frecuencia deseada.

La antena desarrollada se conectó al receptor mediante cable coaxial de 75 Ohm y está operando desde inicios del mes de julio de 2015 en la terraza del Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira, sede del Grupo de Investigación en Astroingeniería Alfa Orión. La instalación se realizó sobre la línea este-oeste, con una orientación paralela al movimiento del planeta Júpiter sobre la bóveda celeste. Actualmente opera en conjunto con el receptor Radio Jove de la NASA sintonizado en 20.1 MHz, el software Radio SkyPipe para la visualización y el almacenamiento de las señales registradas, y el programa Radio Júpiter Pro para la predicción de posibles eventos y la programación de las jornadas de observación.

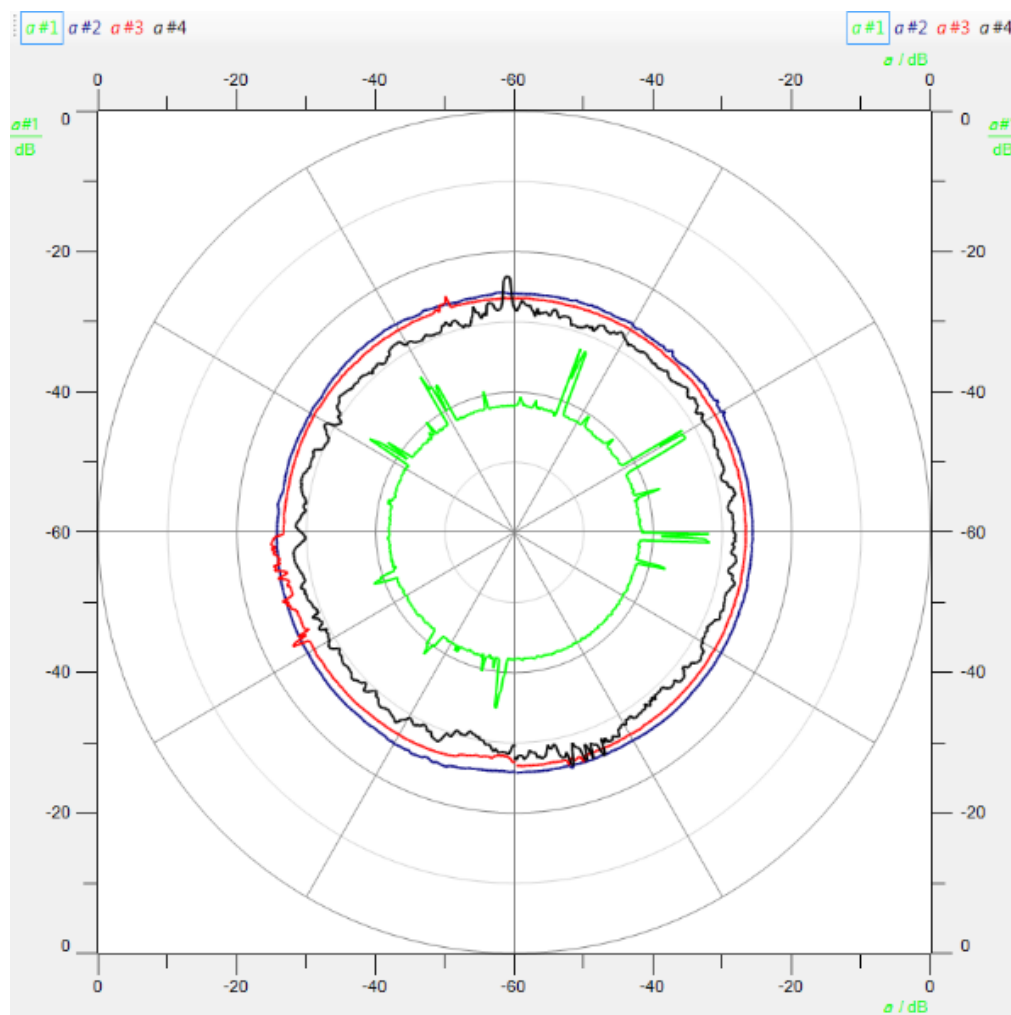


Figura 3.8: Patrones de radiación de la antena desarrollada medidos experimentalmente. Verde: Vacío. Rojo: Frontal. Azul: Lateral. Negro: Utilizando la plataforma de rotación.

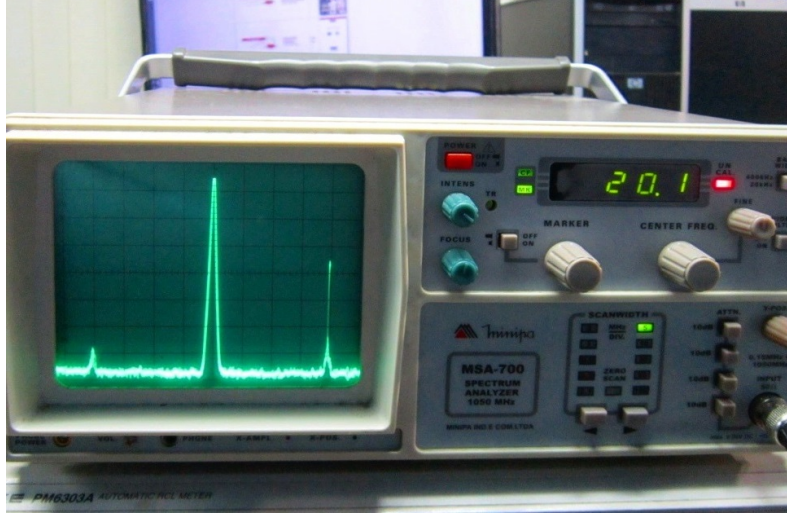


Figura 3.9: Respuesta en frecuencia obtenida en el laboratorio con el analizador de espectro MSA700 para la antena construida.

3.1.4 Temperatura de la antena

En este proyecto se pretende hacer uso del software Radio SkyPipe, para registrar y mostrar los datos de intensidad de señal. La traza de la señal se puede ajustar con el control de volumen del receptor Jove y también con el control de volumen de software en Windows. Al variar estos ajustes de ganancia, la traza se mueve hacia arriba o hacia abajo, sin embargo, no hay ningún punto de referencia absoluto. Las unidades SkyPipe, en la escala vertical (unidades SkyPipe - SPU) no corresponden a unidades como voltios, vatios o grados, de modo que resulta necesario realizar algunos ajustes para hacer que se expresen en términos de un parámetro conocido como temperatura de la antena.

Una resistencia genera una débil tensión de ruido de radiofrecuencia a través de sus terminales debido al movimiento aleatorio de electrones libres del resistor. Si se aumenta la temperatura de la resistencia es claro que dicha señal de ruido aumentará también en amplitud debido a que hay más movimiento térmico de los electrones; ahora, si la resistencia está conectada a un receptor de radio ondas, la potencia de ruido entregada al receptor está dada por la ecuación (3.1)

$$P = K_B T B \quad (3.1)$$

Donde k_B es la constante de Boltzman, T es la temperatura en grados Kelvin y B es el ancho de banda del receptor. Esta ecuación es válida únicamente si existe un acople de impedancias

entre la resistencia y el receptor, para el caso del receptor Jove este acople se dio en 50Ω .

La potencia entregada por la ecuación (3.1) corresponde a la cantidad de alimentación de ruido de fondo galáctico entregado al receptor por medio de la antena, suponiendo que no existe atenuación ni ruido externo. De allí que sea necesario describir la señal que llega al receptor en términos de la temperatura de la antena, haciendo que el ruido existente sea análogo con una temperatura supuesta en los terminales de un resistor. En lugar de utilizar una resistencia física caliente usamos una fuente de ruido calibrado, un dispositivo que genera una cantidad conocida de ruido. Mientras que la medición se hace generalmente con el calibrador conectado directamente al receptor, la temperatura real de la antena debe ser referenciada de nuevo a los terminales de esta, teniendo en cuenta la atenuación en el cable coaxial y otros dispositivos como el mezclador, por ejemplo.

Mediante la conversión de SPU a temperatura absoluta de la antena se puede determinar (en términos cuantitativos) que tan tranquilo o ruidoso es determinado sitio de observación en términos de radio, medir la fuerza de las ráfagas de Júpiter, las ráfagas solares y comparar las mediciones con las de otros observatorios que también se calibren en términos de temperatura de la antena. El asistente de calibración en Radio SkyPipe 2 hace todo el trabajo computacional para el receptor Jove y la fuente de ruido en un solo paso. Se anula el ruido de la tarjeta de sonido y utiliza la señal de temperatura de referencia calibrada para realizar la conversión a la temperatura de la antena.

Cabe mencionar que la fuente de ruido empleada en el proyecto fue la RF 2080 C/F, de la compañía RF Associates, la cual se conecta entre la antena y el receptor. Este dispositivo no solo cumple la función de ser un fuente de ruido calibrado para ajustar las unidades de SkyPipe, sino que también es un filtro pasa banda que reduce o elimina la interferencia que pueda ingresar al receptor causada por las fuertes emisoras internacionales.

3.2 El receptor

El receptor de ondas es un arreglo electrónico cuya función es captar las radio ondas provenientes de cuerpos celestes, para el caso particular de este proyecto, las generadas por el Sol y el planeta Júpiter. Este debe amplificar las ondas de radiofrecuencia recibidas por la antena, puesto que son señales muy débiles en intensidad y producen menos de una millonésima parte de un voltio en los terminales de la antena. Posteriormente convertir dicha onda en una señal

eléctrica lo suficientemente fuerte para que pueda ser llevada a un ordenador en forma de audio o como un gráfico de intensidad de señal en un software determinado. El receptor del proyecto Radio Jove de la NASA está diseñado para operar dentro de un estrecho rango de frecuencias de onda corta centradas en 20.1 MHz. Por esto, fue adquirido de la NASA para su ensamble y puesta a punto en el marco del desarrollo de este trabajo. En términos generales el receptor se estructura de acuerdo a bloques particulares con funciones específicas de la siguiente manera: El primer bloque corresponde a un filtro pasa banda (BPF) cuya función es amplificar las señales de la antena en un factor de 10 y permitir únicamente el paso de frecuencias de interés, para lo cual se vale de un transistor de efecto de campo tipo JFET que garantiza la transferencia eficiente de potencia entre la antena y el siguiente bloque. El segundo bloque corresponde al oscilador local (OL) y al mezclador que convierten las señales deseadas de radiofrecuencia a frecuencias de audio, produciendo una señal senoidal con frecuencia cercana a 20.1 MHz y mezclándola con la señal recibida por la antena. La señal que ingresa a la antena (RF) y la señal generada por el oscilador local (OL), son llevadas al mezclador, el cual genera una nueva señal como la diferencia aritmética entre estas dos, tal como se muestra en la ecuación (3.2).

$$S = OL - RF \quad (3.2)$$



Figura 3.10: Receptor de radiofrecuencia Radio Jove de 20.1 MHz.

Un tercer bloque hace las veces de filtro pasa bajo (LPF), eliminando las estaciones de radiofrecuencia locales que interfieren en las cercanías del receptor, permitiendo el paso de

bajas frecuencias de alrededor de 3.5 kHz y atenúa las frecuencias altas. Finalmente, el último bloque corresponde a un arreglo simple para amplificar la salida de audio y poder llevar la señal adquirida a unos parlantes. En la Figura 3.11 se muestra el diagrama correspondiente al receptor donde se muestra el orden y estructura de los bloques mencionados. El ensamble y construcción del receptor se llevó a cabo siguiendo el manual de usuario del proyecto Radio Jove [43], se identificaron y soldaron sobre el circuito impreso cada uno de los elementos electrónicos (resistencias, capacitores, inductancias, transistores, etc), teniendo en cuenta la correcta posición y polaridad de estos, para finalmente obtener un circuito completo que cumpliera con la representación esquemática del receptor Jove (ver diagrama esquemático del receptor en [43]). Por último, se ensambló la caja externa protectora y se instaló el circuito dentro, obteniendo el receptor que se aprecia en la Figura 3.10.

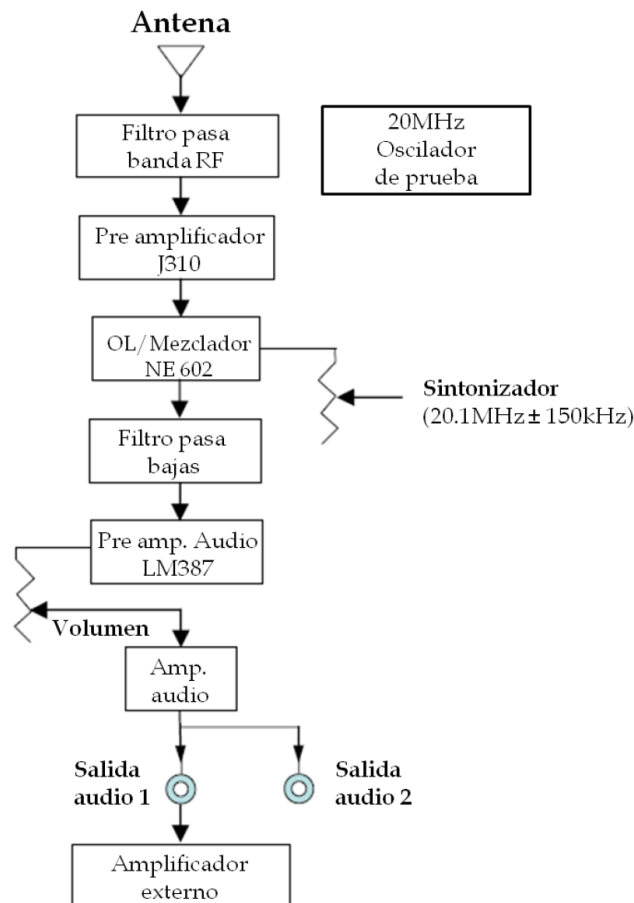


Figura 3.11: Diagrama de bloques del receptor de radio ondas del proyecto Radio Jove de NASA.

3.2.1 Calibración y ajuste

Para obtener un correcto funcionamiento del receptor, es decir, que efectivamente opere en la frecuencia de 20,1 MHz fue necesario realizar un proceso de calibración y ajuste que consistía en modificar los valores de 4 elementos particulares del receptor, dos capacitores variables (C2 y C6) y dos inductores variables (L4 y L5). El proceso se inicia conectando el receptor a unos parlantes para escuchar los tonos que este produce, luego el control de frecuencia se debe fijar en 20 MHz para posteriormente hacer variar el inductor L5 hasta que se escuche una fuerte baja frecuencia, lo cual indica que el ajuste inicial es correcto y la frecuencia de operación del receptor en este punto es cercana a la deseada. El siguiente paso es el ajuste fino para obtener la máxima intensidad de la señal en la salida de audio, es decir, el tono que inicialmente se escuchó al variar el inductor L5 debe ser máximo y esto se logra haciendo variar los otros tres elementos, pero es un proceso que requiere de un oído muy agudo que perciba las variaciones en intensidad o de un software especial al cual se le pueda ingresar la señal de audio y de esa manera realizar una calibración óptima.

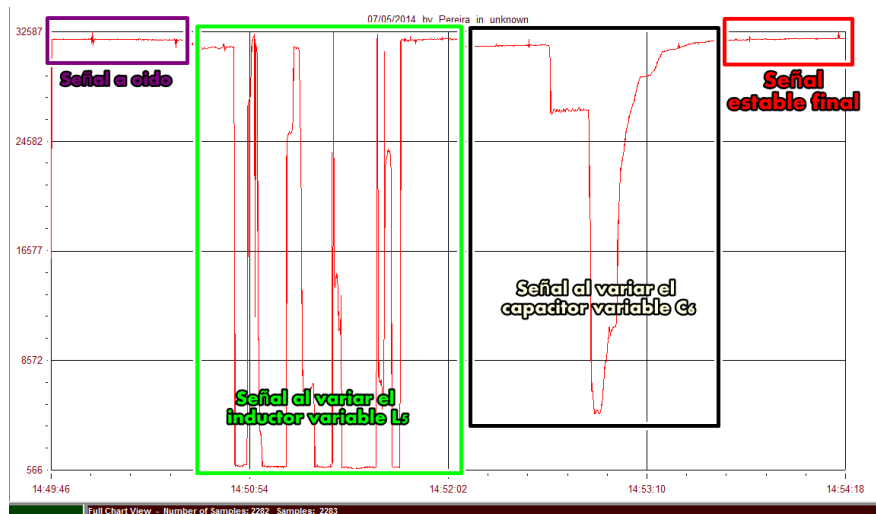


Figura 3.12: Señal registrada en SkyPipe de la intensidad del tono generado por el receptor al variar los valores de L5 Y C6.

Se optó por hacer este procedimiento mediante el software Radio SkyPipe, que permitió obtener la mayor intensidad posible en el tono generado por el receptor, tal como se aprecia en la Figura 3.12. Finalmente, la variación que producen el inductor L4 y el capacitor C5 en la amplitud de la señal es muy poca y teniendo en cuenta que los cambios más significativos se obtienen al variar L5 y C6, la gráfica de la señal final de calibración se presenta en función

de estos dos elementos. La señal generada por el receptor se lleva al computador a través de un cable de audio monofónico para ser digitalizada mediante la tarjeta de sonido, para así ser procesada por el software.

3.3 El software

En todo proyecto astronómico que requiera de instrumentación física, por lo regular la parte de procesamiento y visualización de la información la brinda el software implementado. Para el caso de los proyectos radioastronómicos y en particular para este proyecto, los software empleados fueron Radio SkyPipe y Radio Jupiter Pro, ambos con licencia de operación provista por la NASA. En las siguientes secciones se explica el funcionamiento, características y procedimientos que se deben realizar para que operen de manera óptima.

3.3.1 Radio SkyPipe

Este es un programa de recopilación de datos que permite el intercambio de información analógica de tipo radio ondas, muestreando digitalmente en tiempo real a través de internet u otra conexión IP. También se puede usar como herramienta de recogida de datos independiente por la tarjeta de sonido o a través de un convertidor analógico/digital conectado al puerto del ordenador.

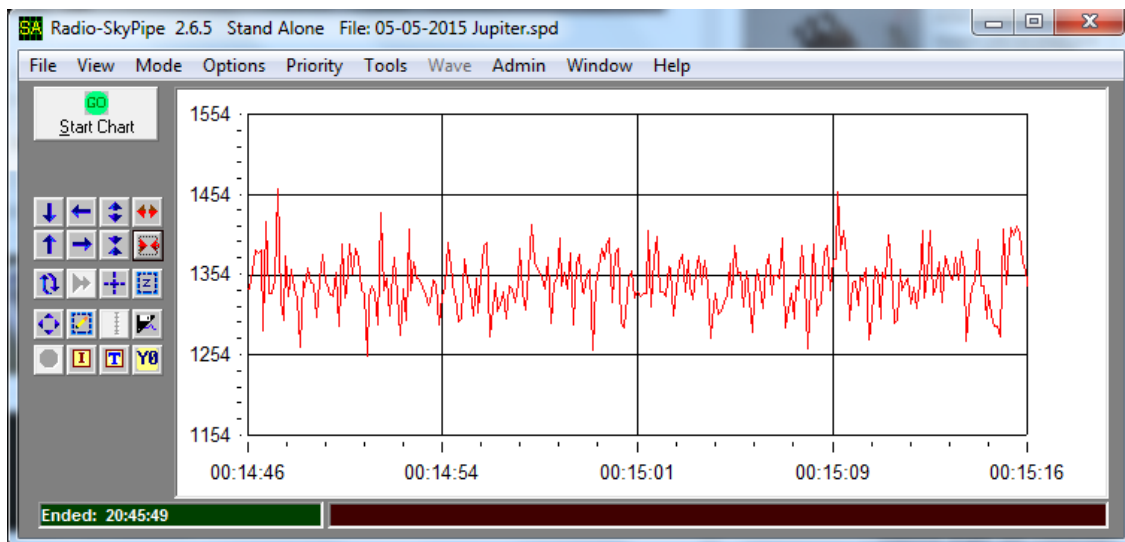


Figura 3.13: Entorno del software Radio SkyPipe.

Este es el software que se usó en el proyecto para tomar los datos digitalizados por la tarjeta de sonido, y realizar su procesamiento, visualización y almacenamiento. Permite crear registros diarios de la actividad solar y joviana desde la perspectiva de las emisiones de onda de radio, brindando un entorno práctico con herramientas de manipulación para la señal procesada (ver Figura 3.13). Este software tiene tres modos de funcionamiento, los cuales son:

- **Independiente:** El PC actúa como un dispositivo de recogida de datos a través de la tarjeta de sonido. Los datos se muestran en una Stripchart que grafica y a la vez se desplaza tomando nuevos datos. Una vez finalizada la observación, el archivo de datos se puede guardar para su visualización o edición en un archivo de extensión spd.
- **Modo de servidor:** Esta es una extensión del modo independiente. Los datos recogidos pueden ser enviados a través de una conexión TCP/IP a uno o más ordenadores remotos que tengan una conexión de radio Radio SkyPipe configurada en modo servidor.
- **Modo Cliente:** En este modo el PC recibe y muestrea los datos que se envían desde un servidor de Radio SkyPipe.

Radio SkyPipe, se puede utilizar en modo servidor o en modo cliente siempre y cuando tenga una conexión a internet permanente. Para usar este software no es necesaria una dirección IP permanente, porque utiliza un ILS (Internet Locator Service) para encontrar otros servidores y permitir que otros hagan uso de los datos generados cuando se esta actuando como un servidor (este ILS es un servicio privado gratuito que corre en el sitio web de Radio-Sky para todos los usuarios de Radio SkyPipe). En pocas palabras, este programa permite registrar y digitalizar las señales que llegan al receptor procedentes de la antena, visualizando de manera instantánea como va evolucionando el registro en la pantalla y manipular en tiempo real grabaciones de sonido, imprimir, procesar o comentar la señal desde el computador. Este software es de fácil manejo, pues solo consta de dos barras de trabajo, una para el control específico de la visualización de la señal y otra para las configuraciones internas o de medición predeterminadas que el usuario desee realizar.

Barra de herramientas

Como se mencionó, esta barra permite realizar los ajustes de forma y de visualización por pantalla necesarios a una señal guardada o mientras se esta grabando. La apariencia de esta barra se muestra en la Figura 3.14.

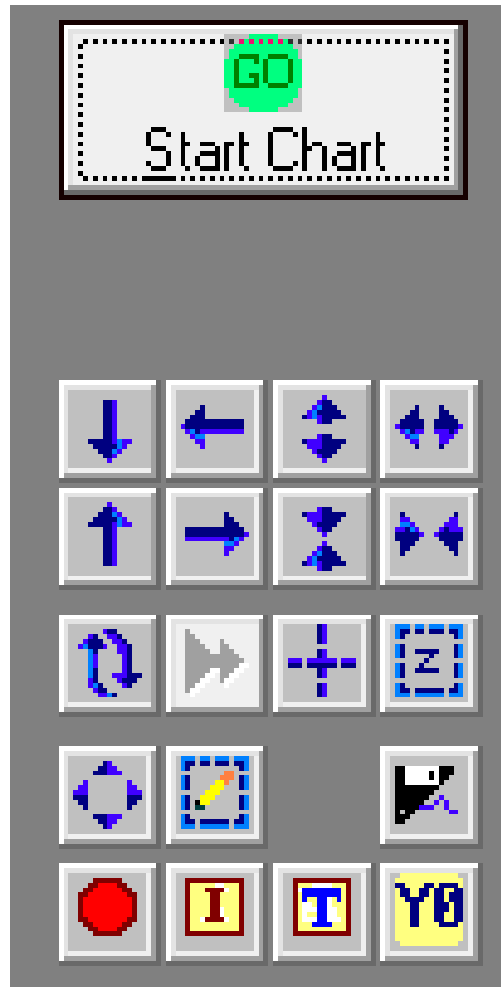


Figura 3.14: *Barra de Herramientas Radio SkyPipe.*

El boton más importante de esta barra es el de *Go-StarChart*, ubicado en la parte superior, pues es quien permite iniciar o finalizar y guardar un registro. Luego en la parte inferior de este, se encuentran 8 botones orientados a la manipulación de límites de visualización y ajuste de escala en los ejes vertical y horizontal. En la parte central de esta barra, se tienen 4 botones que cumplen las funciones de autoescalamiento, autoseguimiento, centrar el cursor y hacer zoom sobre la señal, ubicados de izquierda a derecha, respectivamente.

Por último, en la parte inferior de la barra se encuentran 7 botones orientados a mostrar la señal completa, ingresar manualmente los límites de visualización en la escala de tiempo, guardado específico de la porción de la señal en pantalla, la grabación en audio de la señal, la edición de datos particulares de la señal, introducción de comentarios en partes específicas sobre la señal y establecimiento del punto 0 de medición, ubicados de izquierda a derecha y

desde arriba hacia abajo, respectivamente.

Barra de tareas

Esta barra de tareas cuenta con 10 opciones de ventanas desplegables, cada una para realizar determinadas funciones que se explicarán de manera breve a continuación. La apariencia de esta barra se muestra en la Figura 3.15.

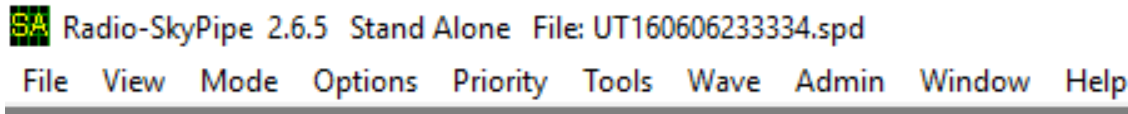


Figura 3.15: *Barra de Tareas Radio SkyPipe.*

- **File:** Desde este menú es posible iniciar un nuevo registro o buscar un registro ya guardado para su análisis, se puede importar o buscar archivos guardados en la red por otros observatorios, imprimir parcial o completamente un archivo, de igual manera se pueden publicar o exportar los registros propios cargándolos al perfil del observatorio. Desde allí mismo se puede guardar, dar nombre y ubicación a un registro particular que se desee guardar en el computador y cargar archivos recientes que no se encuentren de manera sencilla a través del buscador.
- **View:** Desde este menú es posible consultar los datos de los archivos guardados, la información del observatorio que realizó dichos registros, iniciar un nuevo registro en modo cliente y compararlo con la señal propia. Por último, en este menú se encuentran las opciones de visibilidad de la barra de herramientas.
- **Mode:** Desde este menú se configura el software para cada uno de los tres modos de funcionamiento que son independiente, servidor o cliente.
- **Options:** Este es el menú más importante debido a que desde allí se configuran los datos de identidad del observatorio, desde el correo electrónico de contacto hasta las coordenadas de ubicación sobre la Tierra. Allí, se ingresan los datos del tipo de radiotelescopio que hace uso del software y en que frecuencia opera, se configura la interfaz gráfica y el hardware del computador, es decir, que tipo de entrada recibirá el software, si es entrada tipo mono o estereo. También es posible hacer la configuración del sonido de salida, calidad, balance y ecualización, y de la misma manera consultar las configuraciones de otros observatorio.

- **Priority:** En este menú se configura la calidad de los registros medidos ya bien sea en calidad normal, media, alta o de tiempo real.
- **Tool:** En este menú se encuentran una serie de herramientas muy particulares y con determinados enfoques específicos para el análisis sobre una señal elegida por el usuario. Algunos ejemplos de estas herramientas son: Tiempo atómico, para buscar en internet la hora exacta; mezclador de señales, generar una señal nueva como el promedio punto a punto de dos o más señales que ingrese el usuario; buscador de eventos, busca en la base de datos de Radio Sky los registros destacables subidos a la red por los observatorios; contador de eventos, mide sobre una señal la cantidad de picos o subidas abruptas que presenta una señal. Finalmente, en este menú se encuentra las herramientas llamadas Calibration Wizard y Null Sound Background, la primera es la que permite calibrar el eje vertical en función de la temperatura de la antena y la segunda es la que garantiza una referencia de ruido cero para el ruido local en un observatorio en particular.
- **Wave:** En este menú se encuentra todo lo relacionado únicamente con archivos de audio grabados, eventos asociados a los audios, características y marcadores de tiempo que muestran en un listado el momento exacto en el cual se registró un posible evento.
- **Admin:** Las herramientas de este menú solo están disponibles para el modo servidor, y están enfocadas al control y seguimiento de los usuarios que hacen uso de las señales registradas.
- **Window y Help:** En estos dos menús están las opciones de ventanas de trabajo mientras se corre el software y ayuda en internet sobre dudas o necesidades específicas del usuario.

3.3.2 Radio Jupiter Pro

Radio Júpiter Pro, es un software que está orientado al estudio de las tormentas de Júpiter, calcula y predice tormentas de radio e indica la ubicación de Júpiter en el cielo, de tal forma que se pueden planificar con antelación las noches óptimas para la observación del planeta con el radiotelescopio, a diferencia con el Sol cuya observación se realiza de manera continua durante todo el día y no es posible predecir cuando habrá una emisión. En la Figura 3.16 se aprecia el entorno del software Radio Jupiter Pro.

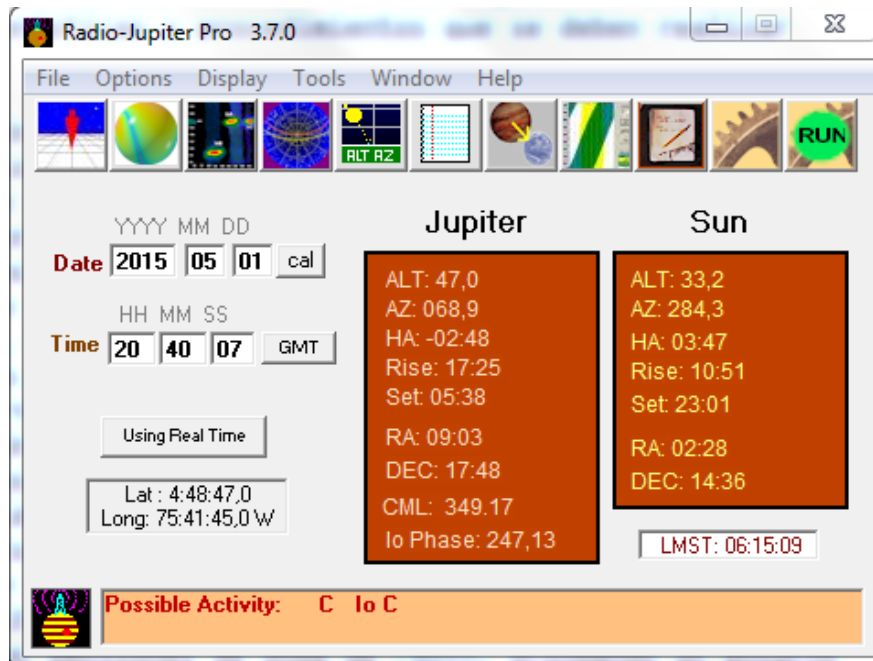


Figura 3.16: Entorno gráfico del software *Radio Jupiter Pro*.

Al iniciar el software, éste calcula los eventos de Júpiter y demás parámetros relacionados con el movimiento joviano y de la misma forma algunos datos útiles del Sol, basándose en la hora y la fecha que tiene el usuario en su computador, de tal forma que al cambiar la hora o la fecha se recalcula todo nuevamente. En la ventana principal aparecen la ascensión recta, la declinación, el azimut y la altura de Júpiter y del Sol, así como sus horas de orto y ocaso. Además, da la longitud del meridiano central de Júpiter (CML) y la fase de Io, que como se mencionó con anterioridad, son los dos parámetros más importantes para el estudio de las tormentas jovianas.

Las opciones más importantes se encuentran en ventanas emergentes que permiten un acceso rápido a cada una de las herramientas del software y las cuales se detallan a continuación.

- **Observador:** Con esta opción se le indica al programa dónde está situado el observatorio en el globo terráqueo. Se pueden ingresar manualmente las coordenadas o se puede hacer uso la base de datos que trae el software.
- **Predicción:** Esta es la opción más importante de todas las herramientas del software, ya que predice los momentos en que la probabilidad de detectar los eventos decamétricos de Júpiter es más alta. Las predicciones se basan en modelos probabilísticos que cor-

relacionan el CML de Júpiter y la posición de Io en su órbita.

- **Efemérides:** Esta herramienta proporciona una tabla con las efemérides de Júpiter para la fecha y el intervalo de tiempo que se desee. En este entorno, *De* se refiere a la declinación jovicéntrica de la Tierra; *Sep*, la separación angular entre Júpiter y el Sol; *Dist*, la distancia a Júpiter en unidades astronómicas (AU); *RA*, ascensión recta; *DEC*, declinación; *Mag Lat*, es la latitud magnética que se enfrenta a la Tierra, y que varía debido a que los polos magnéticos de Júpiter tienen una diferencia de 10 grados con los polos de rotación; *Io SGC*, es la fase de Io, la posición en su órbita referida a la conjunción geocéntrica superior (donde Júpiter está exactamente entre la Tierra e Io); *CML III*, es la longitud del meridiano central de Júpiter en el Sistema III de la Unión Astronómica Internacional.
- **Plano CML-Io:** En esta opción se grafica la disposición de Júpiter en el plano definido por el CML de Júpiter y la fase de Io, con el CML en el eje horizontal, y la fase de Io en el vertical. Las zonas coloreadas en dicho gráfico representan los puntos de máxima probabilidad de tormentas. El recorrido de Júpiter se muestra con líneas blancas cuando está sobre el horizonte y azules cuando está por debajo.
- **Sky Map:** Con esta herramienta se representa una visión del cielo, siendo el cenit el punto central. Muestra el Sol, Júpiter y las estrellas hasta una magnitud límite determinada. Esta opción resulta ser bastante importante puesto que permite ingresar la configuración de la antena que se está utilizando y proyecta los lóbulos de radiación sobre el cielo, lo cual permite elegir la configuración ideal para cada tipo de observación.
- **Gráfico Alt/Az:** En esta ventana se muestra la gráfica altazimutal para el Sol y para Júpiter. En ella aparecen las trayectorias que tendrán ambos objetos durante el día y aparece la posición que ocupan en el cielo en ese mismo instante.
- **Visibilidad:** Esta herramienta permite determinar la visibilidad de Júpiter y del Sol a lo largo de un año. Es útil, para planificaciones de observaciones a largo plazo, para descartar los días en los que es imposible observar.
- **Declinación Joviana:** Calcula la declinación jovicéntrica para un período de varios años y la representa gráficamente. Esta coordenada es la declinación de la Tierra vista desde Júpiter. La probabilidad de que un evento de radio alcance a la Tierra es mayor cuanto más alta esté ésta sobre el cielo de Júpiter.

Capítulo 4

Resultados

Gracias a la implementación realizada en el desarrollo de este proyecto, fue posible finalizar la construcción y puesta a punto de un radiotelescopio que opera en la banda decamétrica con una frecuencia central de 20.1 MHz. Este sistema cuenta con el receptor de radio ondas del proyecto Radio Jove Project de la NASA y los software Radio SkyPipe y Radio Jupiter Pro, que en conjunto con la antena circular magnética diseñada e implementada en el presente trabajo, se encuentran operando de manera efectiva desde el mes de octubre del año 2015. El radiotelescopio, desde su puesta en marcha hasta el mes de junio del año 2016, registró un conjunto de emisiones solares y jovianas en ondas de radio decamétricas, las cuales se validaron, para el caso del Sol, con dos bases de datos en radiofrecuencia, que corresponden al Geostationary Satellite Server (GOES)¹ y el Space Weather Prediction Center (SWPC)², ambos de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)³. Mientras que para el caso de la validación de las señales de Júpiter, se hizo uso del software Radio Jupiter Pro. A continuación se presentan algunos de los resultados medidos y correlacionados en el proyecto.

4.1 Detecciones solares

A continuación se presentan 10 señales de la actividad solar que registró el radiotelescopio de 20.1 MHz en el OAUTP, en cada una de ellas se muestra el trazo en color rojo característico del entorno de Radio SkyPipe, en el cual se aprecia la forma de onda asociada al fenómeno

¹Base de datos de las gráficas del GOES empleadas en el proyecto: http://www.polarlicht-vorhersage.de/goes_archive.

²Base de datos de tablas de registro de eventos empleadas en el proyecto: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse/>.

³<http://www.noaa.gov/>.

solar registrado y también cierto ruido en forma de picos abruptos o impulsos de gran amplitud y muy corta duración. Estos picos se asocian a ruido local de redes eléctricas o sistemas de comunicación radial que logran entrar al receptor a través del ancho de banda que este posee, y que si bien contaminan en cierta medida la señal registrada, no afectan de manera crítica la detección debido a que sigue siendo muy evidente con respecto al piso de ruido⁴. En la Figura 4.1 se muestra un registro de 4 horas donde la señal se mantiene estable sobre el piso de ruido debido a que no hay ninguna actividad en radio durante ese tiempo.

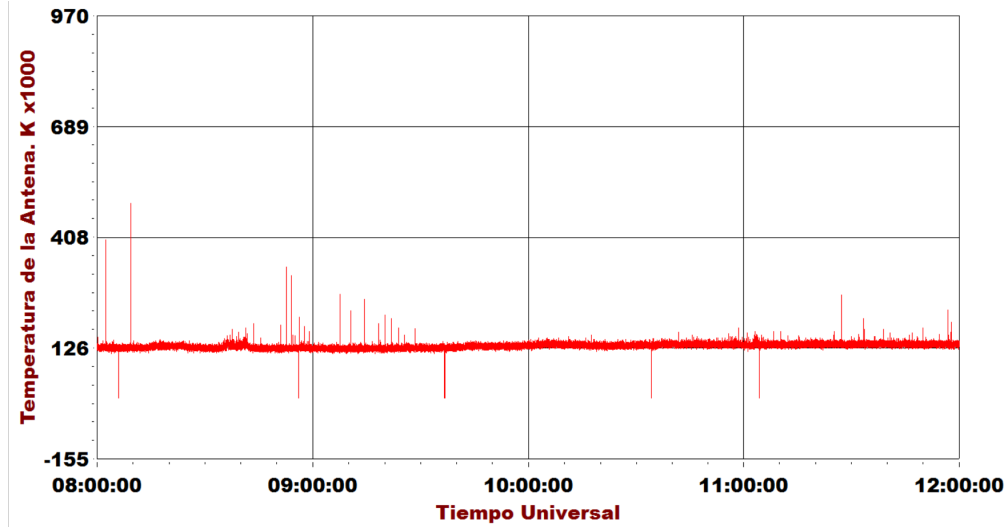


Figura 4.1: *Piso del ruido del sistema.*

Cada uno de estos 10 registros viene acompañado por un par de figuras más con las cuales se realizó la validación de los eventos medidos desde el OAUTP y los registrados por la NOAA. La primera de estas figuras corresponde a la señal registrada por el satélite espacial GOES15 para la misma fecha y el mismo intervalo temporal que el registro asociado del radiotelescopio del OAUTP. Como se podrá apreciar las formas de onda no son exactamente iguales, debido a que el satélite espacial GOES15 es un instrumento de medición empleado para registrar eventos solares en rayos X, es decir, trabaja en una frecuencia totalmente distinta a 20.1 MHz, pero como se mencionó con anterioridad los eventos solares emiten en todas las frecuencias del espectro electromagnético, por lo cual cuando se genera una emisión en rayos X, ciertas componentes de radiofrecuencia están también inmersas en dicha emisión, lo cual hace que las señales tengan cierto parecido.

⁴Línea de referencia de la señal en la cual no se generó ningún tipo de actividad en radio, por lo cual la señal se mantiene estable sobre un valor determinado de temperatura.

Los registros del GOES15 se muestran en un entorno de color negro sobre el cual se encuentran todos los datos relevantes del registro (día, fecha y hora de medición), al igual que una gráfica en escala logarítmica de flujo electromagnético (W/m^2) en función del tiempo, con la cual es posible clasificar los eventos solares en rayos X⁵. En cada una de estas figuras se aprecian dos trazos, uno de color gris y otro de color verde/amarillo que corresponden al registro de la actividad solar en los intervalos de 0.5 a 4.0 amstrong y de 1.0 - 8.0 amstrong, respectivamente. Para algunos de los registros medidos en el OAUTP las formas de onda en ocasiones guardarán más semejanza con el trazo de color gris (corta longitud de onda), mientras que para otras la semejanza será más evidente en el trazo de color verde/amarillo (larga longitud de onda).

Finalmente, la segunda figura que acompaña cada registro del OAUTP corresponde a la base de datos del SWPC, en esta figura se muestra un tabla de los parámetros característicos del evento registrado: Número de evento, hora de inicio, hora en la que se presento el máximo, hora de finalización, el observatorio que lo registró, la calidad, el tipo de fenómeno asociado, la banda del espectro en la que se produjo, la clasificación de la emisión y la región del Sol asociada. Gracias a esta base de datos fue posible asociar a cada uno de los registros medidos, la region del Sol y el fenómeno solar que los produjo.

La Figura 4.2 muestra el primer registro de una detección solar captada por el radiotelescopio, la cual corresponde al día 6 de noviembre del 2015 y que posee duración aproximada de 1 hora con 15 minutos. En esta figura es clara la presencia de 6 picos que sobresalen por encima del piso de ruido de 333 Ta⁶, los 4 primeros son picos abruptos de corta duración y amplitud inferior a 700 Ta, mientras que los otros dos, son picos amplios de mayor intensidad y más larga duración. De la Figura 4.3 se tiene que para este caso la mayor semejanza es con el trazo en color gris en el cual se distinguen algunos de los picos abruptos y son muy claros los dos picos amplios. Por último, con base en la Figura 4.4 se puede concluir que esta emisión en radio registrada se encuentra asociada con dos tipos de eventos distintos una llamarada solar (FlA: Flare) y un evento en rayos X clase C1.8.

⁵Esta clasificación se explica con más detalle en: http://www.spaceweather.com/glossary/flareclasses_spanish.html.

⁶Para fines prácticos Ta simboliza temperatura de la antena en kelvin por mil, es decir, 333 Ta es equivalente a 333000K

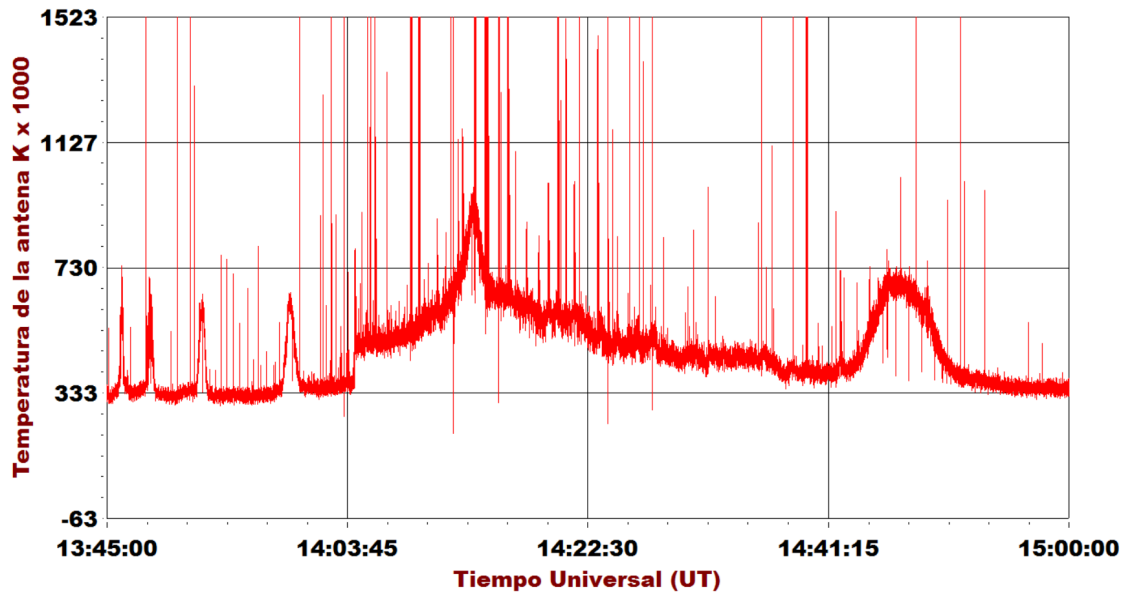


Figura 4.2: *Detección solar del día 6 de noviembre de 2015, registrada por el Radio Jove.*

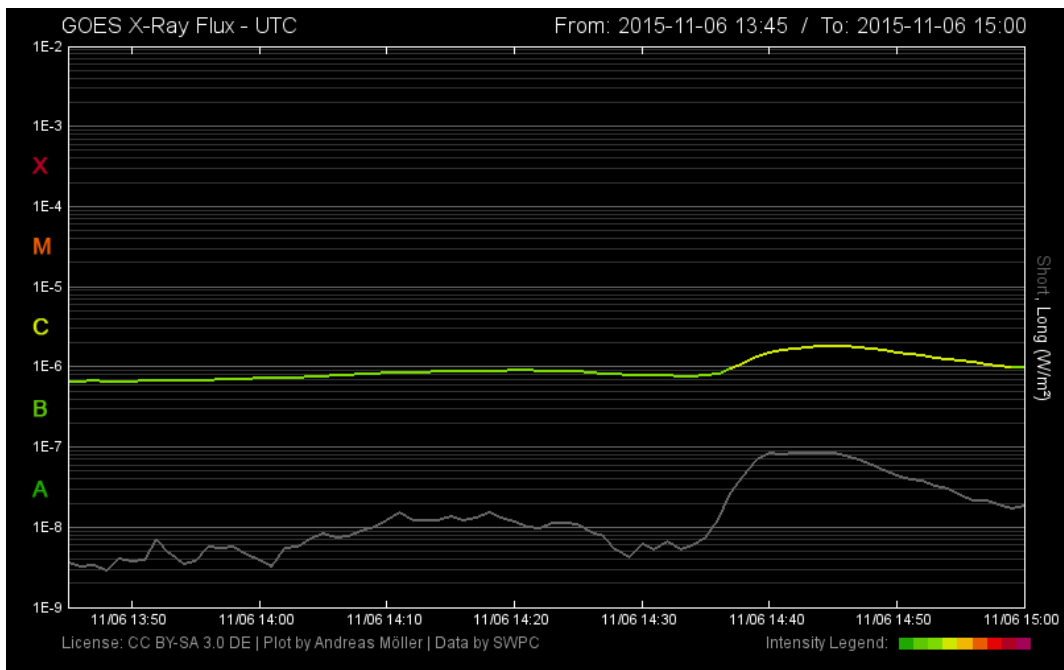


Figura 4.3: *Detección solar del día 6 de noviembre de 2015, registrada por el satélite espacial GOES.*

```

:Product: 20151106events.txt
:Created: 2015 Nov 09 0357 UT
:Date: 2015 11 06
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2015 Nov 06
#
#Event   Begin   Max     End  Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars  Reg#
#-----
2480 +   1435   1446   1454  G15   5   XRA  1-8A    C1.8        1.6E-03  2449
2480     1446   1504   1509  HOL   3   FLA  S14E88   SF          DSD

```

Figura 4.4: Tabla de registro del día 6 de noviembre de 2015 realizada por el Space Weather Prediction Center.

En la Figura 4.5 se aprecia el segundo registro de una detección solar captada por el radiotelescopio, la cual corresponde al día 21 de noviembre del 2015 y que posee duración aproximada de 1 hora con 30 minutos. En esta figura se presenta un único pico bastante amplio y con amplitud de 568 Ta sobre un piso de ruido de 260 Ta, es decir, para esta emisión se presentó un incremento de 308 Ta, lo cual implica que fue un evento bastante energético. A partir de la Figura 4.6 se puede corroborar esta afirmación, pues es claro al observar el trazo de color verde/amarillo que la intensidad de flujo es bastante grande. También es de notar que para esta detección la cantidad de ruido presente sobre la señal es bastante, pues en este caso la cantidad de picos picos abruptos es mayor que para otras detecciones captadas, sin embargo como se había comentado al inicio, este ruido no afecta el registro de manera crítica si se considera que aún con el ruido presente, la forma de onda es muy evidente con cual se pudo llevar a cabo la validación de manera acertada al comparar e identificar esta forma de onda con las medidas por el GOES.

Por último, con base en la Figura 4.7 se puede concluir que esta emisión en radio registrada se encuentra asociada con dos eventos en rayos X, uno clase C2.0 y otro clase C3.3 y por otro lado que el valor máximo para la emisión en radio frecuencia desde el OAUTP se produce sobre las 14:10 UTC mientras que en rayos X ese máximo se presenta algunos minutos antes, con lo cual se concluye que para este fenómenos solar se emitieron primero las ondas de rayos X y luego las ondas de radio.

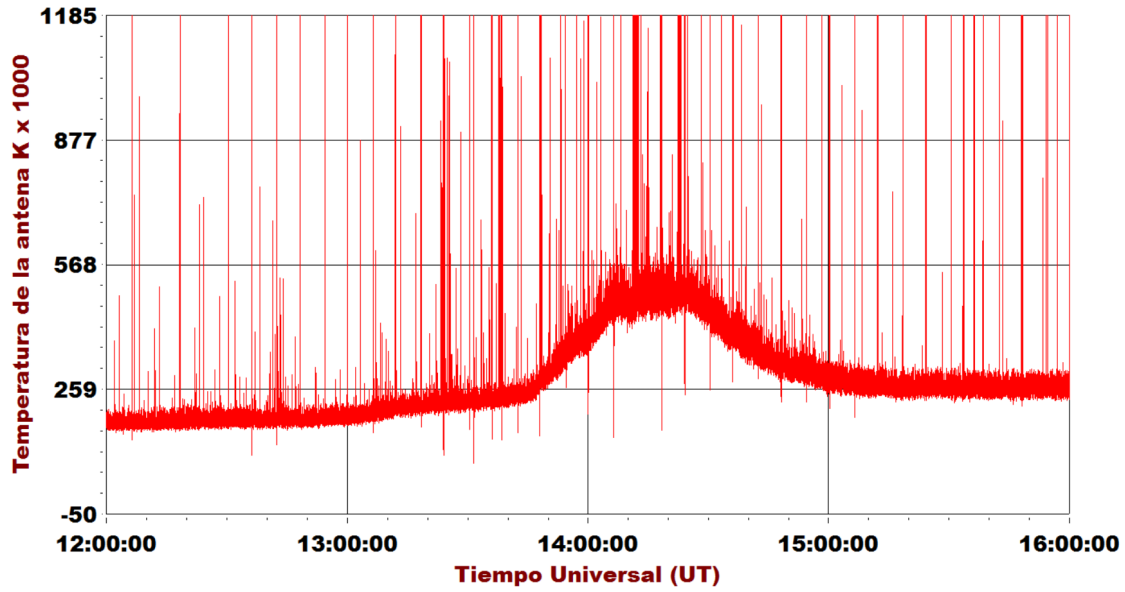


Figura 4.5: *Detección solar del día 21 de noviembre de 2015, registrada por el Radio Jove.*

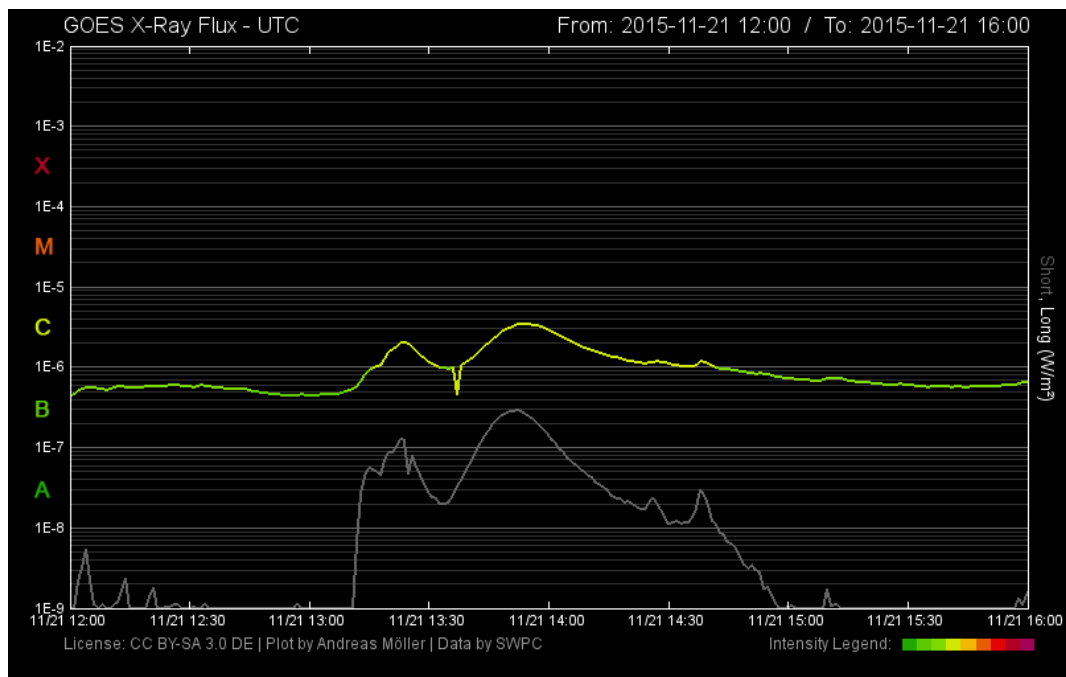


Figura 4.6: *Detección solar del día 21 de noviembre de 2015, registrada por el satélite espacial GOES.*

```

:Product: 20151121events.txt
:Created: 2015 Nov 24 0357 UT
:Date: 2015 11 21
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2015 Nov 21
#
#Event   Begin   Max   End Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars  Reg#
#-----
3560 +   1311   1324   1329 G15  5   XRA  1-8A    C2.0    1.4E-03  2454
3610     1336   1353   1405 G15  5   XRA  1-8A    C3.3    4.3E-03  2454

```

Figura 4.7: *Tabla de registro del día 21 de noviembre de 2015 realizada por el Space Weather Prediction Center.*

En la Figura 4.8 se aprecia el tercer registro de una detección solar captada por el radiotelescopio, la cual corresponde al día 12 de febrero de 2016 y que posee duración aproximada de 40 minutos. En esta figura se presentan dos picos, uno agudo de amplitud 335 Ta sobre un piso de ruido de 174 Ta, seguido inmediatamente por otro pico amplio y de la misma magnitud, con esto se tiene que esta emisión es de una magnitud más baja que la anterior. A partir de la Figura 4.9 nuevamente se puede corroborar esto, pues se aprecia que la intensidad de flujo no es tan grande y que la semejanza entre las formas de onda esta vez se le atribuye al trazo color gris.

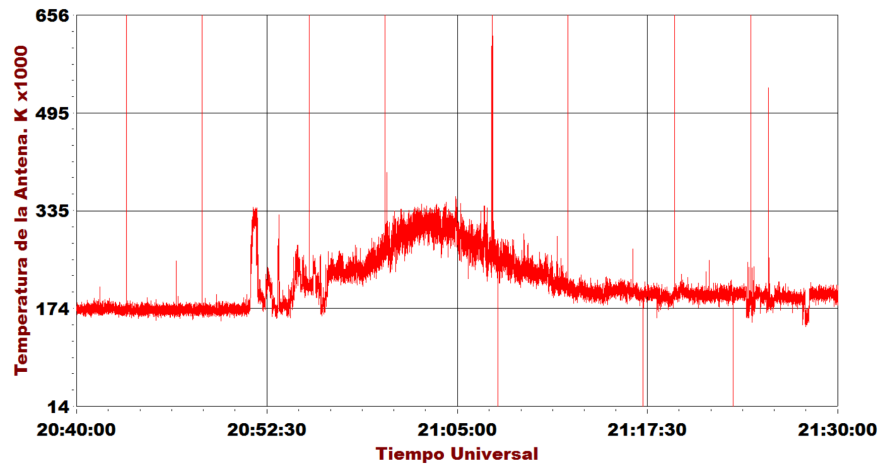


Figura 4.8: *Detección solar del día 12 de febrero de 2016, registrada por el Radio Jove.*

Por último, con base en la Figura 4.10 se puede concluir que esta emisión en radio se encuentra asociada con los eventos Fixed-frequency radio burst (RBR), Sweep-frequency

radio burst (RSP) y el evento en rayos X (XRA) B7.5 y por otro lado, a diferencia del caso anterior, que el valor máximo para la emisión en radio frecuencia desde el OAUTP se produce sobre las 21:00 UTC mientras que en rayos X ese máximo se presenta algunos minutos despues, con lo cual se concluye que para este fenómenos solar se emitieron primero las ondas de radio y luego los rayos X.

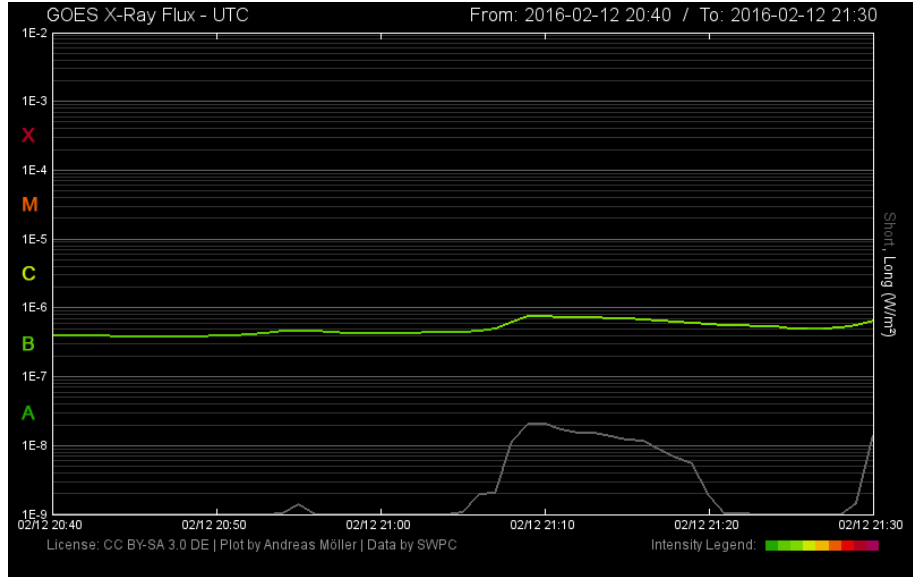


Figura 4.9: *Detección solar del día 12 de febrero de 2016, registrada por el satélite espacial GOES.*

```
:Product: 20160212events.txt
:Created: 2016 Feb 15 0357 UT
:Date: 2016 02 12
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2016 Feb 12
#
#Event   Begin   Max     End  Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars  Reg#
#-----
4390     2023    2023    2023  PAL  U   RBR   245      120
4390 +   2023    ////    2023  SAG  C   RSP   025-129  III/2
4400 +   2105    2110    2120  G15  5   XRA   1-8A     B7.5      5.3E-04  2497
```

Figura 4.10: *Tabla de registro del día 12 de febrero de 2016 realizada por el Space Weather Prediction Center.*

La Figura 4.11 muestra el cuarto registro solar captado por el radiotelescopio, la cual corresponde al día 14 de marzo de 2016 y que posee duración aproximada de 1 hora. En esta figura se presentan dos subidas consecutivas de la señal, cada una de ellas con una amplia duración y una magnitud de 300 Ta sobre un piso de ruido de 160 Ta.

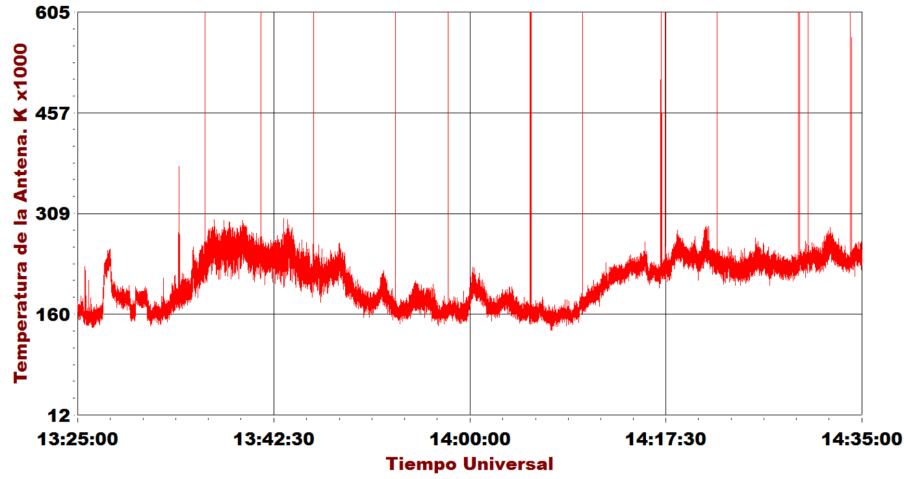


Figura 4.11: *Detección solar del día 14 de marzo de 2016, registrada por el Radio Jove.*

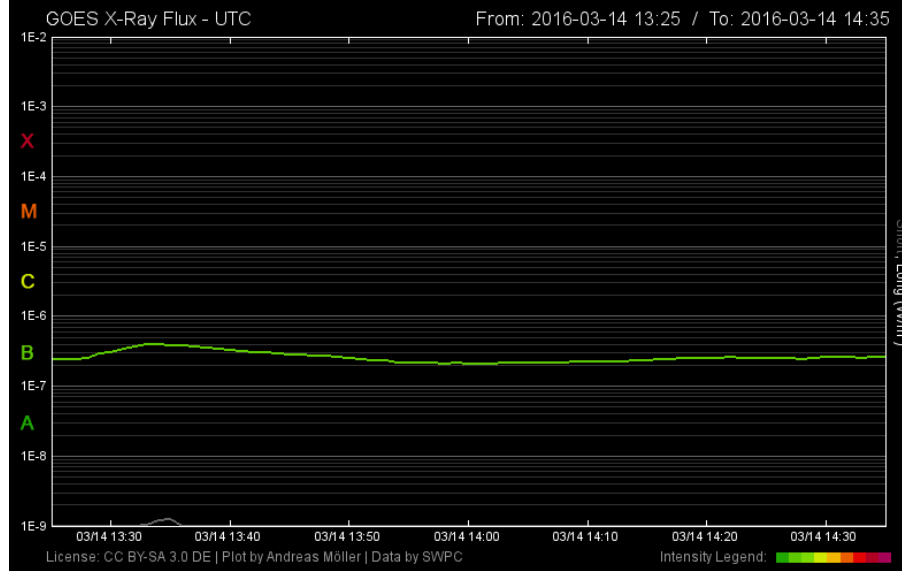


Figura 4.12: *Detección solar del día 14 de marzo de 2016, registrada por el satélite espacial GOES.*

Para esta señal, la intensidad de flujo es baja, lo cual se ve reflejado en la Figura 4.12,

donde el trazo verde/amarillo también tiene ambas subidas pero con una muy baja magnitud, aunque se debe recordar que esta figura está en escala logarítmica por lo cual los picos no son tan pronunciados. Finalmente, con la Figura 4.13 se puede concluir que esta emisión en radio se asocia con 3 eventos RSP en la banda 25-180 MHz, que se produjeron en ese intervalo de tiempo.

```

:Product: 20160314events.txt
:Created: 2016 Mar 17 0357 UT
:Date: 2016 03 14
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ///
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2016 Mar 14
#
#Event   Begin   Max   End  Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars  Reg#
#-----
7400     1329    ///   1330  SVI  C   RSP   025-180  III/1
7410     1412    ///   1413  SAG  C   RSP   101-180  III/1
7410     1412    ///   1429  SVI  C   RSP   025-180  VI/1

```

Figura 4.13: Tabla de registro del día 14 de marzo de 2016 realizada por el Space Weather Prediction Center.

En la Figura 4.14 se aprecia el quinto registro solar captado por el radiotelescopio, este corresponde al día 28 de marzo de 2016 y posee duración aproximada de 30 minutos. En esta figura se aprecia un pico amplio de magnitud 315 Ta sobre un piso de ruido de 150 Ta, es decir, una amplitud moderada en flujo.

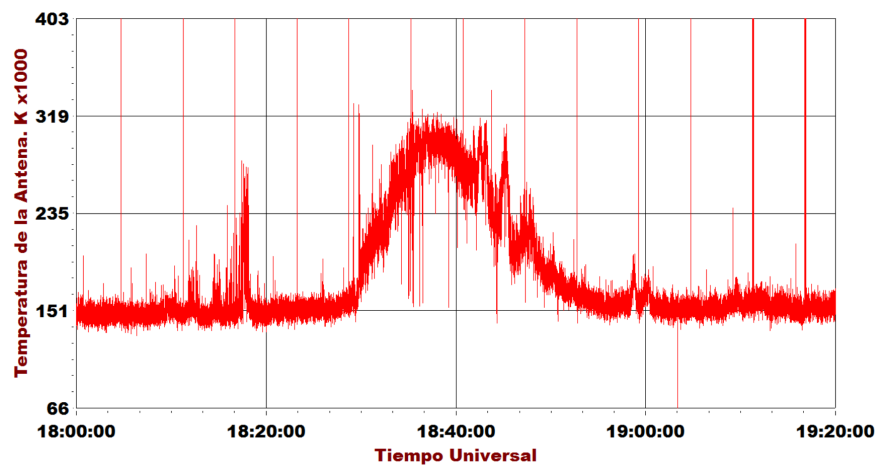


Figura 4.14: Detección solar del día 28 de marzo de 2016, registrada por el Radio Jove.

En la Figura 4.15 (trazo gris), también se puede observar este mismo pico, además de otros dos consecutivos de menor intensidad, los cuales no aparecen de manera tan evidente en el registro captado por el OAUTP. Por último, con la Figura 4.16 se le atribuye este registro a la emisión XRA clase B3.4 para la cual el máximo se generó en 18:44 UTC mientras que para el OAUTP se generó unos pocos minutos antes.

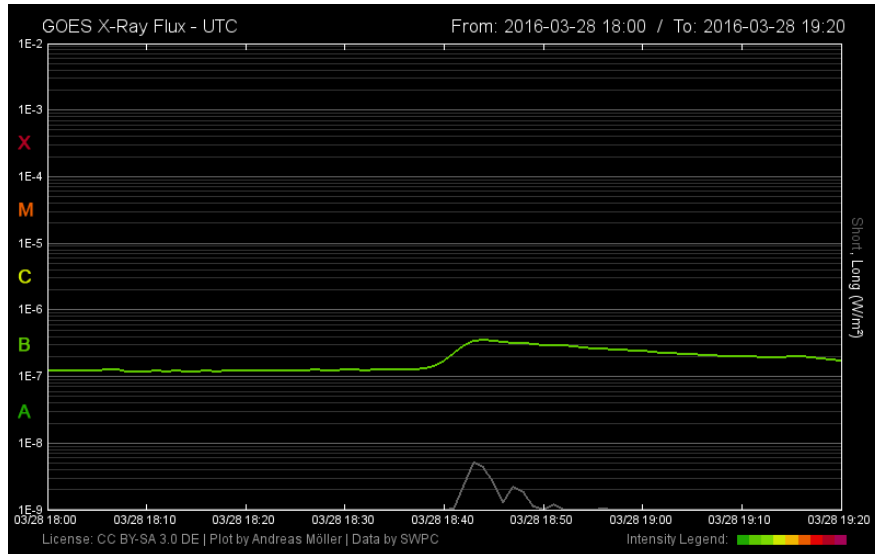


Figura 4.15: *Detección solar del día 28 de marzo de 2016, registrada por el satélite espacial GOES.*

```
:Product: 20160328events.txt
:Created: 2016 Mar 31 0357 UT
:Date: 2016 03 28
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ///
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2016 Mar 28
#
#Event   Begin   Max    End  Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars  Reg#
#-----
8680 +   1838   1844   1900  G15  5   XRA  1-8A    B3.4        3.4E-04  2524
```

Figura 4.16: *Tabla de registro del día 28 de marzo de 2016 realizada por el Space Weather Prediction Center.*

En las Figuras 4.17 y 4.19 se muestra el sexto registro solar captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 5 de abril de 2016. Este registro estuvo dividido en dos emisiones

independientes, la primera con una duración de 1 hora con 30 minutos y la segunda con una duración de 30 minutos. Para la primera emisión se tiene una amplitud de 380 Ta sobre un piso de ruido de 280 Ta, mientras que para la segunda se tiene una amplitud de 340 Ta sobre un piso de ruido de 194 Ta.

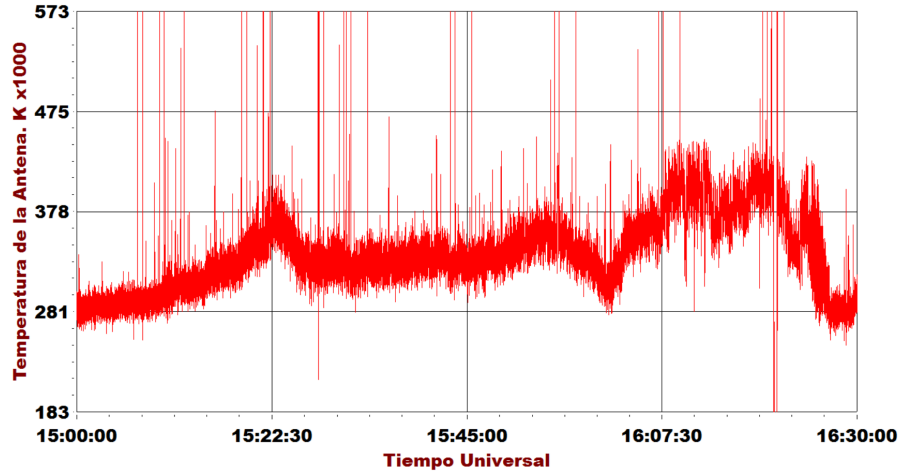


Figura 4.17: *Detección solar del día 5 de abril de 2016 (15:00-16:30 UTC), registrada por el Radio Jove.*

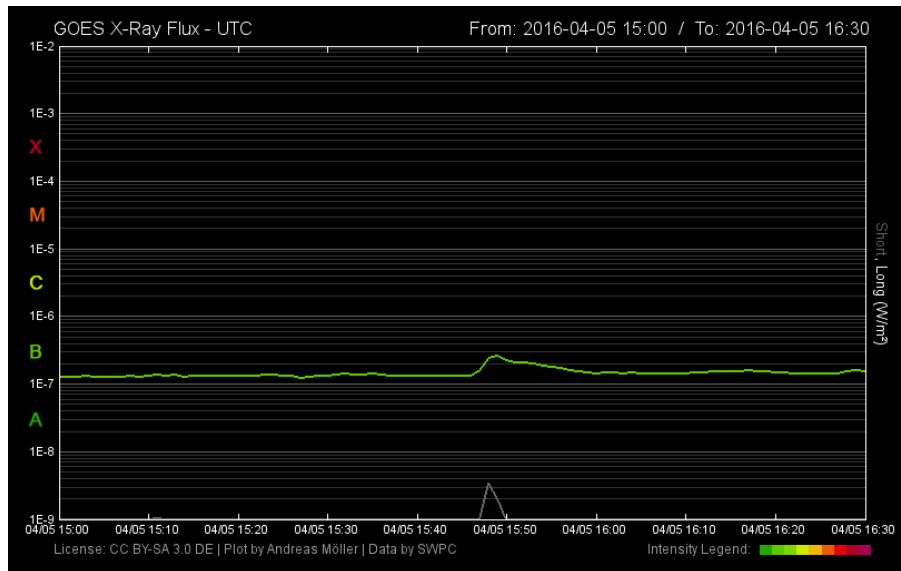


Figura 4.18: *Detección solar del día 5 de abril de 2016 (15:00-16:30 UTC), registrada por el satélite espacial GOES.*

Las Figuras 4.18 y 4.20 son las imagenes del GOES15 que se usaron para correlacionar las formas de onda registradas en el OAUTP, con lo cual se encontró que existía cierta similitud entre ambas, sobre todo al comparar con el trazo color gris, donde son evidentes los picos que sobresalen por encima del valor estable de flujo en cada emisión. Por último, con la Figura 4.21 se concluyó que ambas emisiones estaban ligadas a fenómenos del tipo rayos X, de clase B2.5 para la primera emisión y clase B2.8 para la segunda.

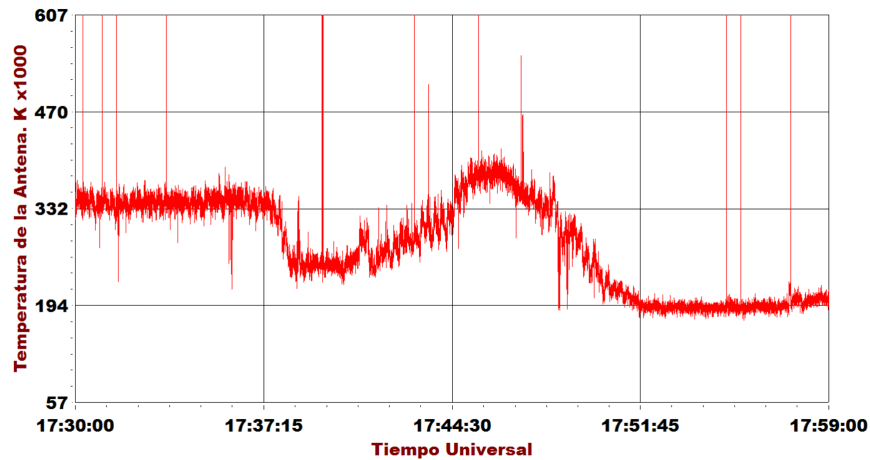


Figura 4.19: *Detección solar del día 5 de abril de 2016 (17:30-18:00 UTC), registrada por el Radio Jove.*

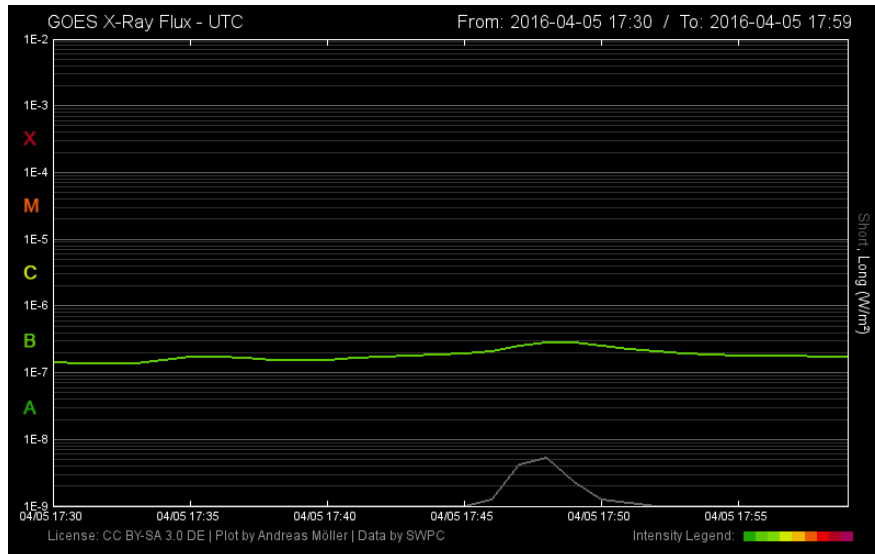


Figura 4.20: *Detección solar del día 5 de abril de 2016 (17:30-18:00 UTC), registrada por el satélite espacial GOES.*


```

:Product: 20160405events.txt
:Created: 2016 Apr 08 0357 UT
:Date: 2016 04 05
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2016 Apr 05
#
#Event   Begin   Max   End Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars  Reg#
#-----
8950 +   1546   1549   1554 G15  5   XRA  1-8A    B2.5    7.6E-05  2528
8960     1745   1748   1751 G15  5   XRA  1-8A    B2.8    6.2E-05  2528

```

Figura 4.21: Tabla de registro del día 5 de abril de 2016 realizada por el Space Weather Prediction Center.

En la Figura 4.22 se muestra el séptimo registro solar captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 26 de abril de 2016. Este registro presenta un pico pequeño de baja amplitud y duración seguido por pico de mayor tamaño en amplitud (140 Ta sobre 98 Ta) y duración (20 minutos). Si bien esta emisión es la que posee menor magnitud de todos los registros medidos, es claro en el trazo gris de la Figura 4.23 la presencia de esta pico, lo cual permitió realizar la correlación entre ambas señales. Finalmente, con base en la Figura 4.24 se concluye que esta emisión esta relacionada con un XRA clase B8.0 cuyo máximo se da casi a la par con la emisión en ondas de radio.

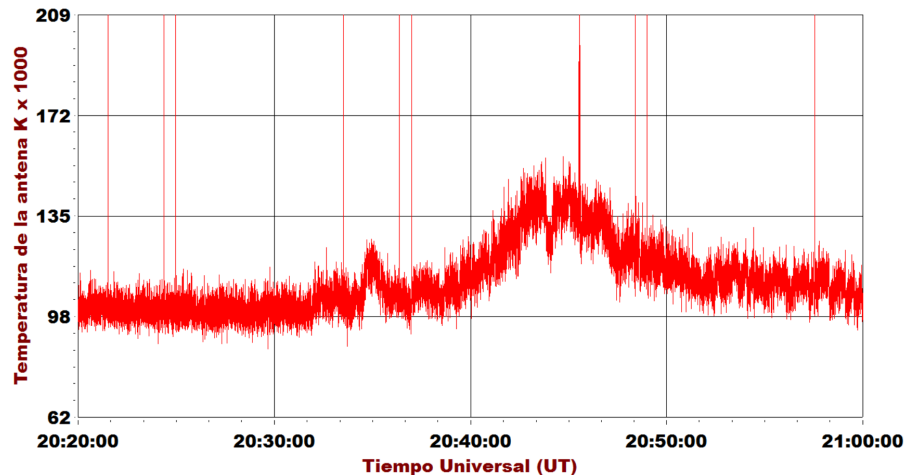


Figura 4.22: Detección solar del día 26 de abril de 2016, registrada por el Radio Jove.

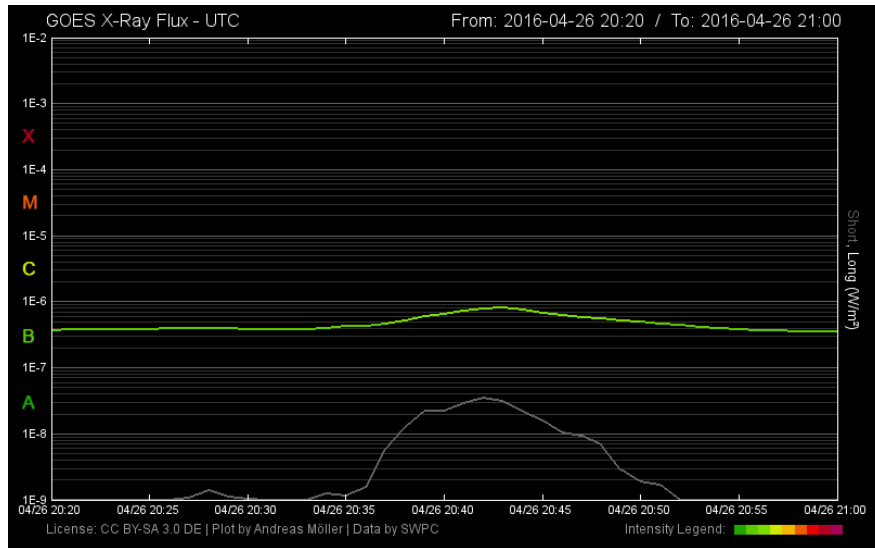


Figura 4.23: Detección solar del día 26 de abril de 2016, registrada por el satélite espacial GOES.

```
:Product: 20160426events.txt
:Created: 2016 Apr 29 0357 UT
:Date: 2016 04 26
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2016 Apr 26
```

#Event	Begin	Max	End	Obs	Q	Type	Loc/Frq	Particulars	Reg#
3150	2037	2043	2046	G15	5	XRA	1-8A	B8.0	3.0E-04

Figura 4.24: Tabla de registro del día 26 de abril de 2016 realizada por el Space Weather Prediction Center.

En la Figura 4.25 se muestra el último registro solar captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 9 de junio de 2016. Este registro presenta dos picos espaciados por un tiempo de 20 minutos, el primero de ellos con una amplitud de 230 Ta y el segundo con una amplitud de 280 Ta, ambos sobre un piso de ruido de 155 Ta y con una duración aproximada de 7 minutos. La Figura 4.26 muestra el registro del GOES15 para la misma fecha y hora, en el cual la semejanza entre las formas de onda es totalmente evidente tanto en el trazo gris como en el verde/amarillo.

Por último, con base en la Figura 4.27 se concluye que estos picos en radiofrecuencia se encuentran asociados a los fenómenos de llamarada solar (FLA) y emisión de rayos X (XRA) clase B9.9 y C1.5.

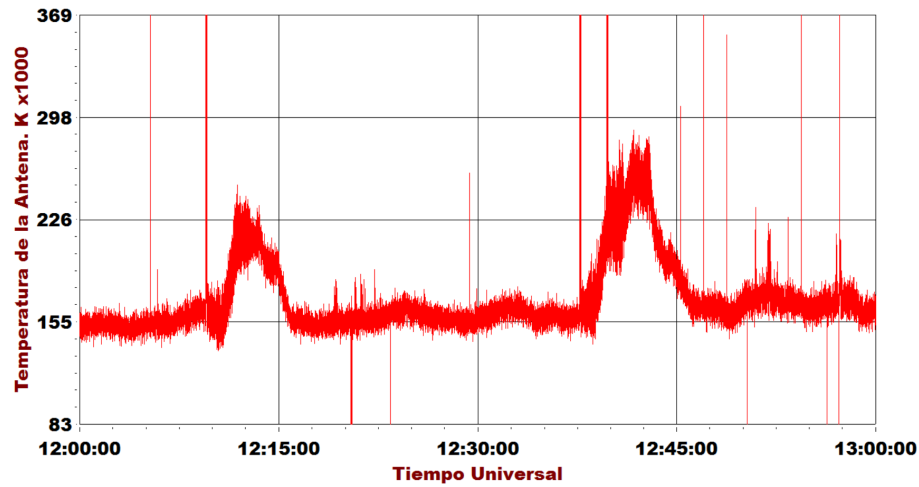


Figura 4.25: Detección solar del 9 de junio de 2016, registrada por el Radio Jove.

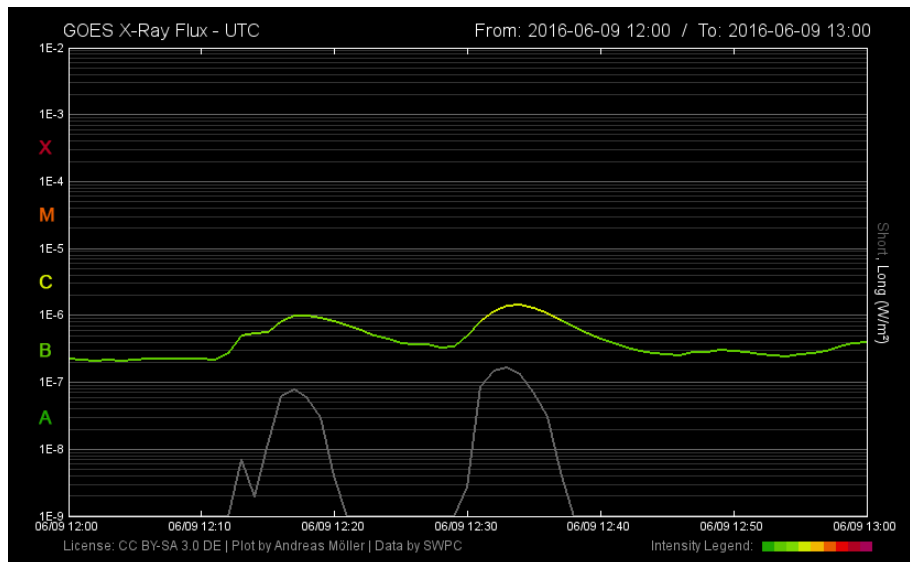


Figura 4.26: Detección solar del día 9 de junio de 2016, registrada por el satélite espacial GOES.

```

:Product: 20160609events.txt
:Created: 2016 Jun 12 0357 UT
:Date: 2016 06 09
# Prepared by the U.S. Dept. of Commerce, NOAA, Space Weather Prediction Center
# Please send comments and suggestions to SWPC.Webmaster@noaa.gov
#
# Missing data: ////
# Updated every 5 minutes.
#
# Edited Events for 2016 Jun 09
#
#Event   Begin   Max   End  Obs  Q  Type  Loc/Frq  Particulars  Reg#
#-----
9630     1209    1218   1223  G15  5   XRA  1-8A    B9.9    4.9E-04  2552
9630     1213    1233   1249  SVI  3   FLA  N14W42  SF      ERU      2552
9640     1228    1234   1237  G15  5   XRA  1-8A    C1.5    5.0E-04

```

Figura 4.27: Tabla de registro del día 9 de junio de 2016 realizada por el Space Weather Prediction Center.

4.2 Detecciones jovianas

A continuación se presentan 7 señales de la actividad joviana que registró el radiotelescopio de 20.1 MHz en el OAUTP. Cada uno de estos 7 registros viene acompañado por una figura más, la cual contiene información acerca de la probabilidad de ocurrencia de una emisión joviana en ondas de radio y gracias a la cual se realizó la validación de los eventos medidos desde el OAUTP. Estas imágenes se extrajeron de la herramienta de predicción de tormentas jovianas del software Radio Jupiter Pro, la cual hace uso de modelos probabilísticos que correlacionan el CML de Júpiter y la posición de Io en su órbita para generar intervalos temporales asociados a la posible activación de alguna de las 6 radiofuentes jovianas.

El entorno gráfico de esta herramienta solo necesita de un dato de entrada, que es la fecha a la que se desea predecir la actividad, para de inmediato generar una tabla de predicción de eventos, en la cual se relaciona la radiofuente particular que cumple las condiciones para su activación y el intervalo temporal durante el cual tendrá probabilidad de generar alguna emisión. Además de esto, también se genera sobre dicha tabla una imagen muy práctica en la cual se le asigna un color determinado a cada una de las seis radiofuentes de la siguiente manera: Radiofuente A con color amarillo, radiofuente B con color rojo, radiofuente C con color verde, radiofuente Io-A con color rosado, radiofuente Io-B con color azul y radiofuente Io-C con color naranja.

Por último, esta imagen también muestra la hora local y la hora UTC, las coordenadas de

ascensión recta y declinación joviana, la altitud del Sol e indica, dependiendo de la época del año, el intervalo de visibilidad solar, datos que resultan ser muy necesarios a la hora de programar jornadas de observación.

La Figura 4.28 muestra el primer registro joviano captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 9 de febrero de 2016. Este registro presenta una serie 7 de picos de diferentes magnitudes y duraciones que se generaron en un lapso de tiempo de aproximadamente 20 minutos. Los cuatro primeros picos se relacionan con una emisión tipo S mientras que los dos últimos con una tipo L. Por otro lado, con una magnitud máxima de 352 Ta sobre un piso de ruido de 244, esta primera emisión registrada corrobora la afirmación de que Júpiter es casi igual de energético en ondas de radio que el Sol. La Figura 4.29 muestra la ventana de predicción asociada al 9 de febrero, en la cual se ve claramente que esta emisión en particular fue generada por la radiofuente tipo C, dentro del intervalo de probabilidad 02:25-4:22 UTC.

Sin embargo, se puede apreciar en la Figura 4.28 que el último pico está fuera de este intervalo, lo cual se debe a que estos intervalos de tiempo se calculan con base en los intervalos angulares mencionados con anterioridad. Estos últimos tienen cierta incertidumbre en su medida lo que implica que los intervalos de tiempo también los tendrán, por lo cual en ocasiones se puede generar actividad algunos pocos minutos antes o después del intervalo probabilístico determinado.

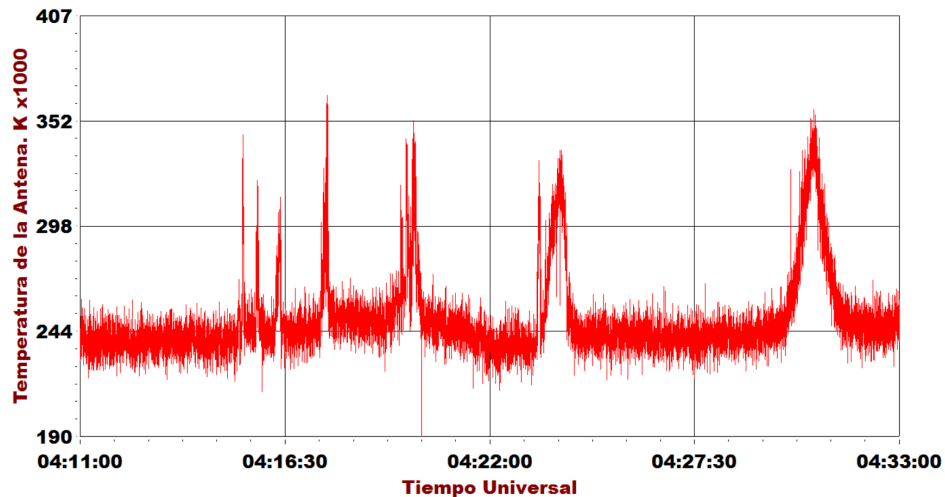


Figura 4.28: *Detección joviana tipo C del 9 de febrero de 2016 registrada por el radiotelescopio.*

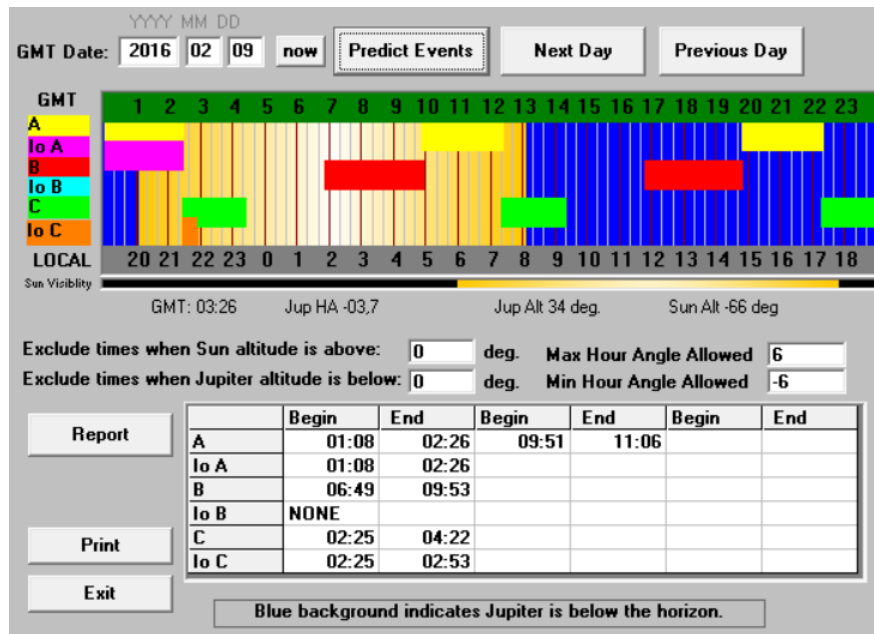


Figura 4.29: Ventana de predicción para el evento joviano tipo C del 9 de febrero de 2016 entregada por el software Radio Jupiter Pro.

En la Figura 4.30 se muestra el segundo registro joviano captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 13 de febrero de 2016. Este registro presenta dos picos consecutivos de magnitud aproximadamente igual (460 Ta sobre 349Ta), con una duración de 15 minutos, por lo cual se relacionan con una emisión tipo L.

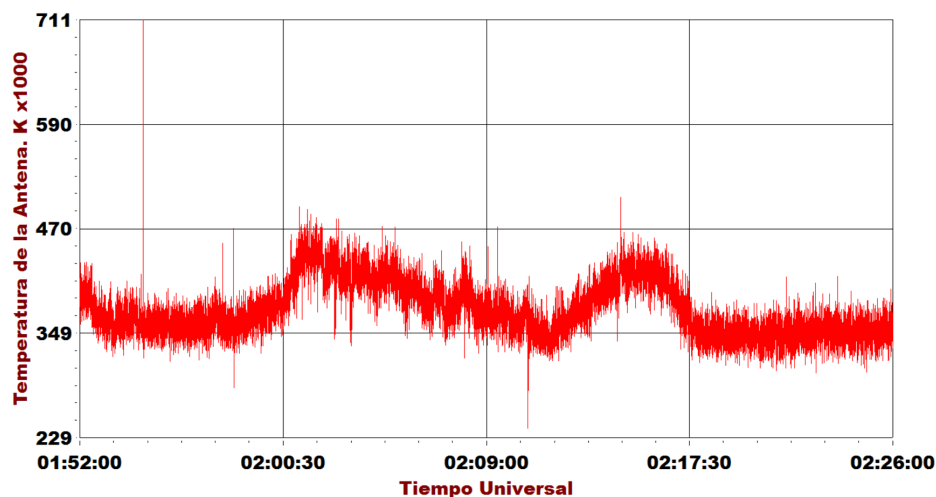


Figura 4.30: Detección joviana tipo B del 13 de febrero de 2016 registrada por el radiotelescopio.

Por otro lado, en la Figura 4.31 se muestra la ventana de predicción asociada a este día, con lo cual se determina que la emisión provino de la fuente Tipo B, dentro del intervalo de probabilidad 00:51-3:11 UTC.

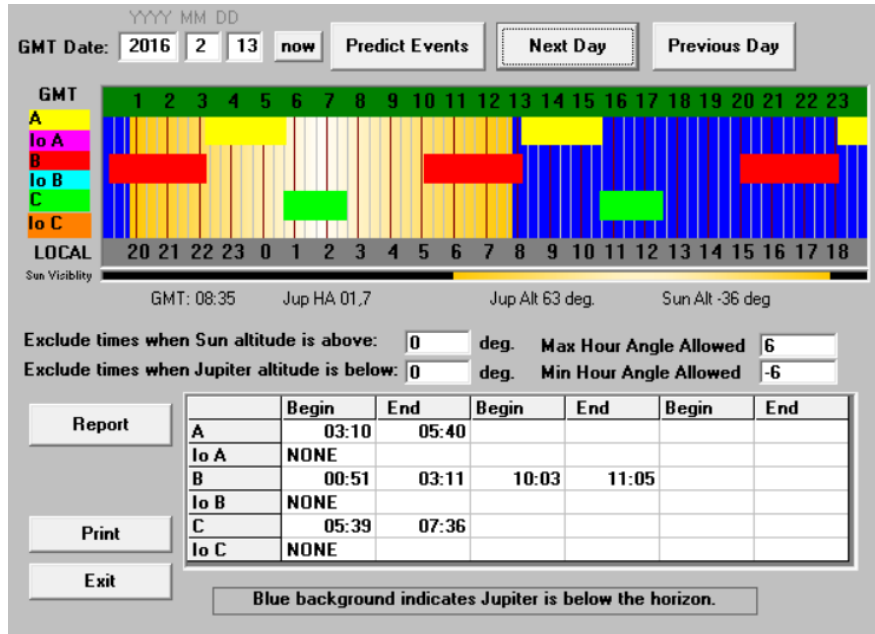


Figura 4.31: Ventana de predicción para el evento joviano tipo B del 13 de febrero de 2016 entregada por el software Radio Jupiter Pro.

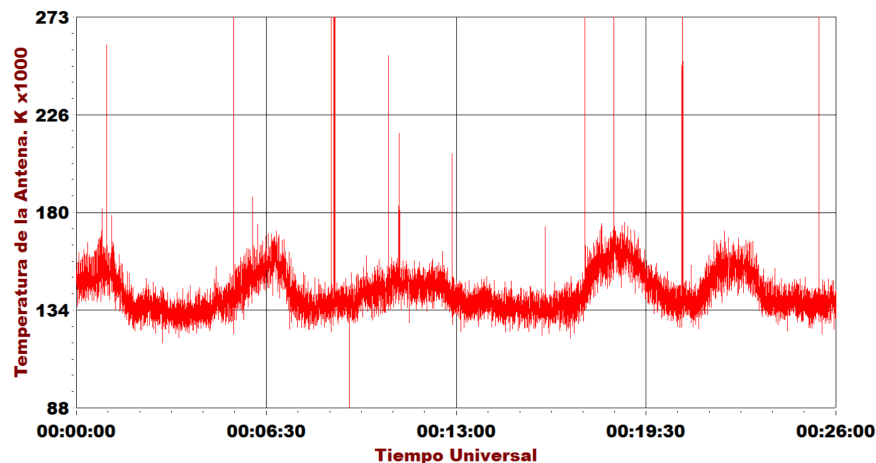


Figura 4.32: Detección joviana tipo A y C del 14 de marzo de 2016 registrada por el radiotelescopio.

En la Figura 4.32 se muestra el tercer registro joviano captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 14 de marzo de 2016. Este registro presenta 4 picos consecutivos de magnitud baja (170 Ta sobre 134Ta), con una duración de 25 minutos, por su forma de onda se relacionan con una emisión tipo L. Finalmente, en la Figura 4.33 se muestra la ventana de predicción asociada a este día, con cual se determina que esta emisión provino de las fuentes A y C, dentro de los intervalos de probabilidad 00:00-00:09 UTC y 00:07-02:05 UTC, respectivamente.

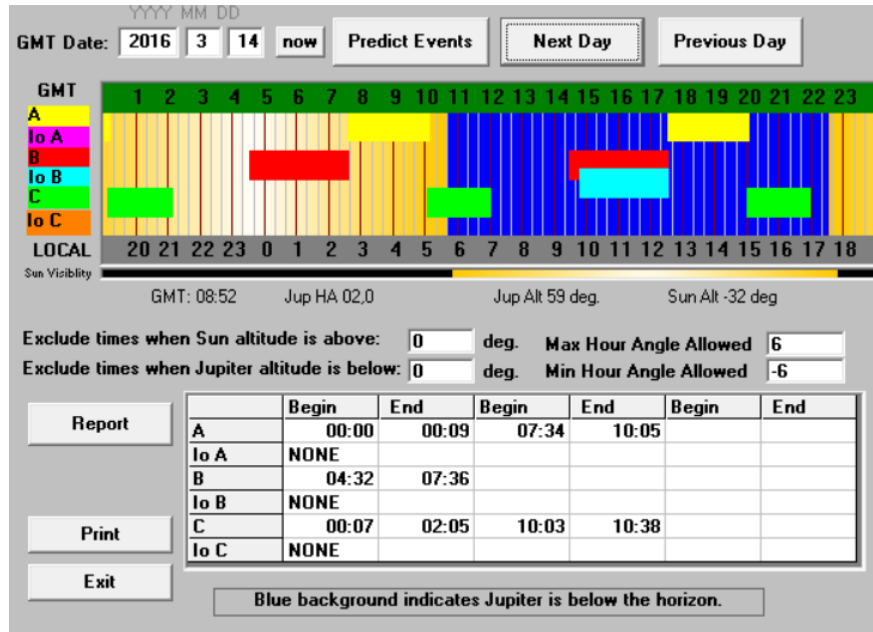


Figura 4.33: Ventana de predicción para el evento joviano tipo A y C del 14 de marzo de 2016 entregada por el software Radio Jupiter Pro.

En las Figuras 4.34 y 4.35 se muestra el cuarto registro joviano captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 30 de marzo de 2016. La primera emisión presenta una combinación de picos estrechos sobre picos amplios de magnitud promedio de 369 sobre 257 Ta, con lo cual se determina que es un evento tipo L y S superpuesto. Para la segunda emisión se tienen dos picos consecutivos de magnitud 500 sobre 345 Ta, con una amplia duración, 10 minutos aproximadamente, por lo cual es un evento tipo L. Como se puede notar, el piso de ruido puede variar de manera paulatina a lo largo de toda la jornada de observación debido a diversos factores (la proximidad del amanecer, el progresivo aumento de la actividad humana, etc), sin embargo cuando se presenta una emisión los cambios sobre el piso de ruido se generan en períodos mas cortos de tiempo con variaciones significativas en magnitud.

Por otro lado, en la Figura 4.36 se muestra la ventana de predicción asociada a este día, con cual se determina que estas dos emisiones provinieron de las fuentes B y A dentro de los intervalos de probabilidad 00:00-00:42 UTC y 00:40-03:11 UTC, respectivamente.

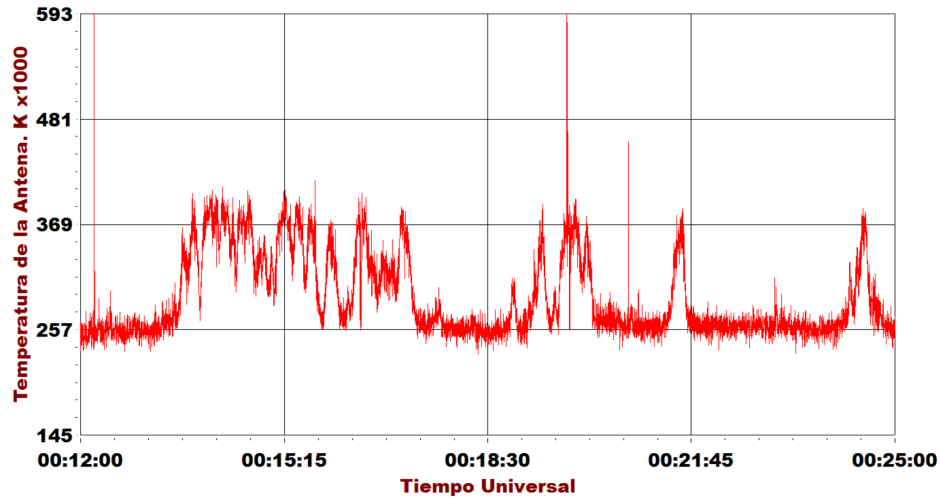


Figura 4.34: *Detección joviana tipo B del 30 de marzo de 2016 registrada por el radiotelescopio (00:12-00:25 UTC).*

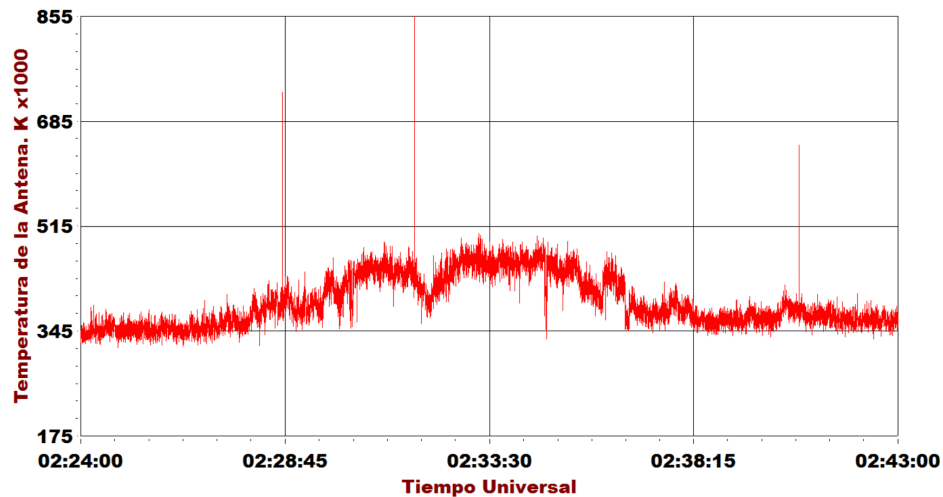


Figura 4.35: *Detección joviana tipo A del 30 de marzo de 2016 registrada por el radiotelescopio (02:24-02:43 UTC).*

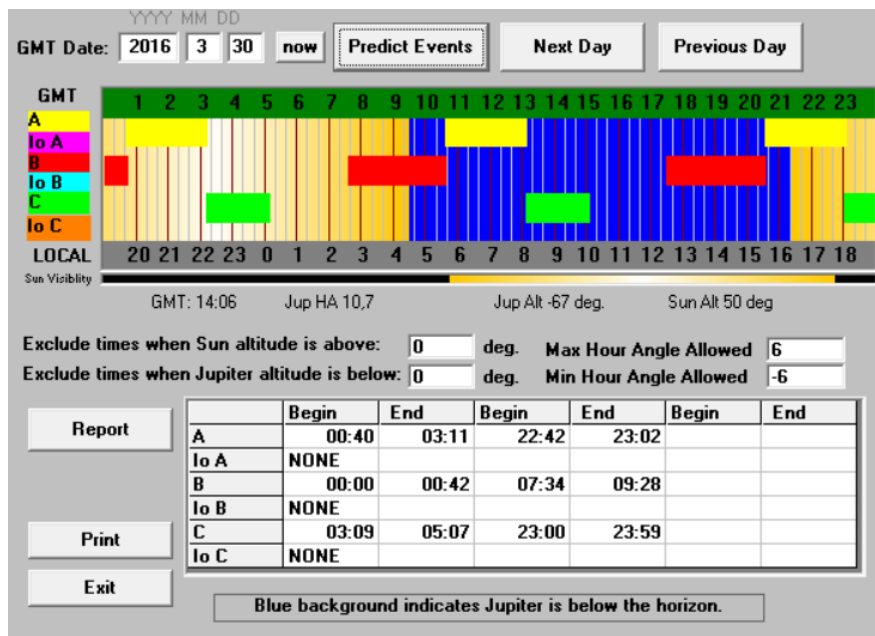


Figura 4.36: Ventana de predicción para el evento joviano del 30 de marzo de 2016 con emisiones tipo A y B entregada por el software Radio Jupiter Pro.

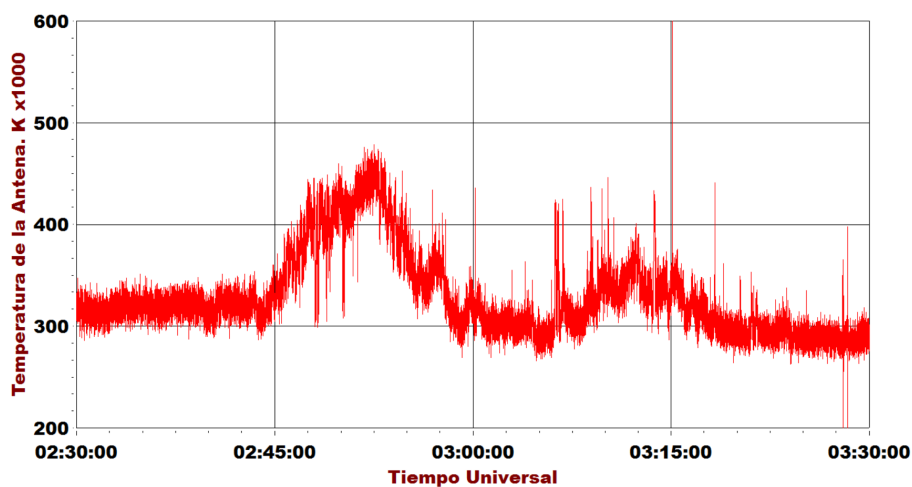


Figura 4.37: Detección joviana tipo A del 6 de abril de 2016 registrada por el radiotelescopio.

En la Figura 4.37 se muestra el quinto registro joviano captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 6 de abril de 2016. Este registro presenta dos picos consecutivos de magnitud 450 sobre 300 Ta y 300 sobre 350 Ta, respectivamente. Ambos corresponde a una

forma de onda característica de las emisiones tipo L. Por otro lado, en la Figura 4.38 se muestra la ventana de predicción asociada a este día, con lo cual se determina que la emisión provino de la fuente Tipo A, dentro del intervalo de probabilidad 01:23-3:53 UTC.

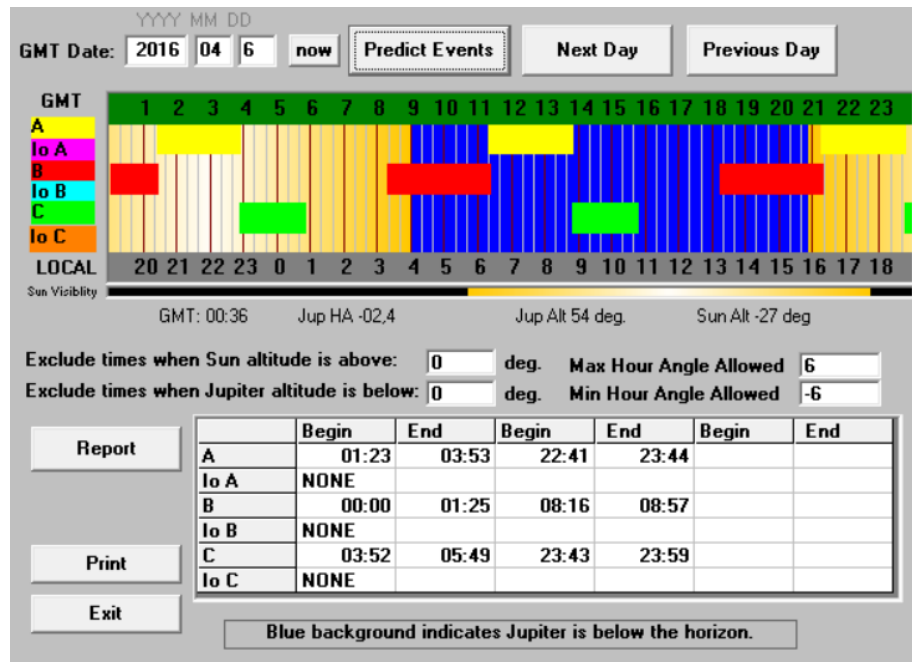


Figura 4.38: Ventana de predicción para el evento joviano tipo A del 6 de abril de 2016 entregada por el software Radio Jupiter Pro.

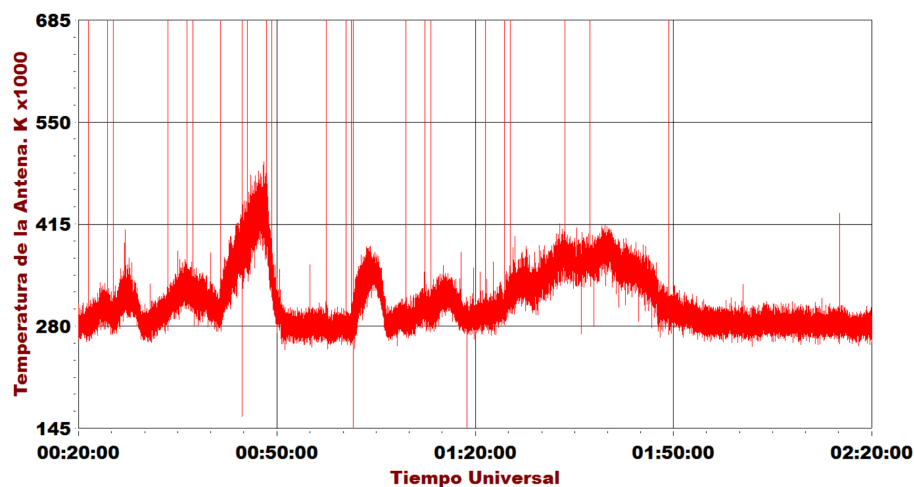


Figura 4.39: Detección joviana tipo B del 8 de abril de 2016 registrada por el radiotelescopio.

En la Figura 4.39 se muestra el último registro joviano captado por el radiotelescopio, correspondiente al día 8 de abril de 2016. Este registro presenta varios picos consecutivos de diferentes magnitudes, todos correspondientes a emisiones tipo L. Finalmente, en la Figura 4.40 se muestra la ventana de predicción asociada a este día, con lo cual se determina que la emisión provino de la fuente Tipo B, dentro del intervalo de probabilidad 00:00-3:02 UTC.

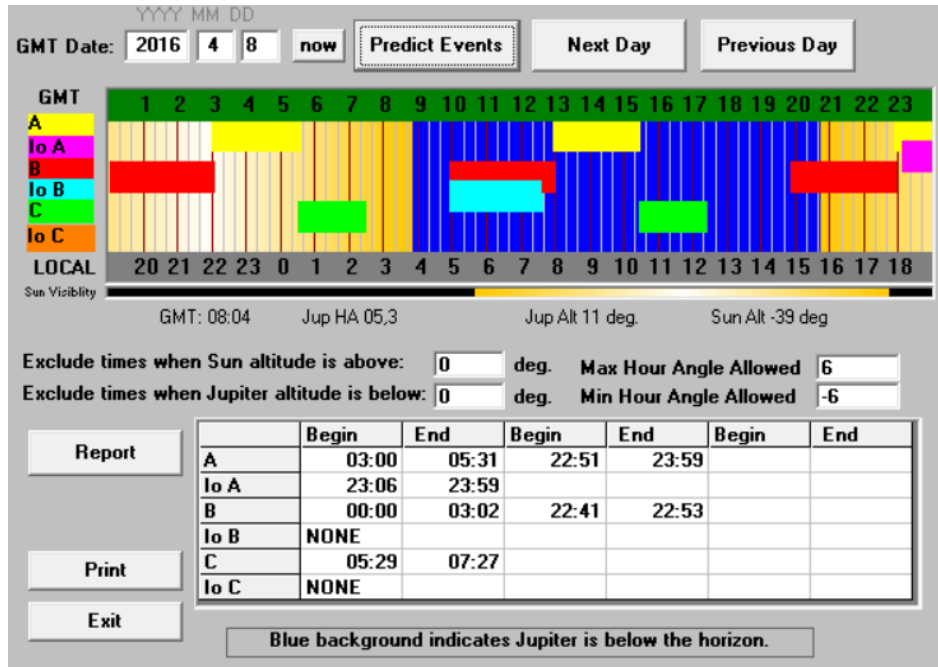


Figura 4.40: Ventana de predicción para el evento joviano tipo B del 8 de abril de 2016 entregada por el software Radio Jupiter Pro.

Capítulo 5

Conclusiones

Con la ejecución de este proyecto se consiguió cumplir el objetivo general propuesto al inicio del mismo, el cual consiste en el desarrollo de un radiotelescopio de 20.1 MHz que actualmente se encuentra operando en las instalaciones del OAUTP, y cuyo objetivo fundamental es el estudio de los fenómenos solares y jovianos en radiofrecuencia.

El ensamble, calibración y puesta a punto del receptor Jove de NASA fue exitoso. Para el estudio del Sol y Júpiter en la frecuencia de 20.1 MHz, este receptor resulto ser el más apropiado, esto debido a que las características electrónicas que presenta se ajustan muy bien a los requerimientos de los fenómenos que se midieron, es decir, un buen ancho de banda para el amplio espectro de frecuencia de ambas fuentes observadas, una alta selectividad gracias al filtrado por etapas que permitió la eliminación del ruido local y frecuencias no deseada y una buena ganancia provista por la etapa amplificadora, que permitió el registro de las señales de más baja intensidad como es el caso de las emisiones jovianas. Finalmente, es importante mencionar que si bien el receptor cuenta con filtros para la eliminación del ruido, este sigue siendo propenso al ruido generado por redes eléctricas, tormentas eléctricas o computadores que se encuentren cerca, por lo cual es recomendable aislarlo al máximo de fuentes generadoras de ruido o inactivarlo cuando las condiciones climáticas no permitan la observación. Sin embargo, debido a que este ruido tiene la característica de ser instantáneo, no afectó la observación de los eventos solares y jovianos registrados.

Se consiguió construir una antena de tamaño reducido en comparación con las tradicionales antenas dipolo utilizadas para el registro de la actividad joviana y solar en ondas de radio, pero con un patrón de radiación muy similar y una operación eficiente en 20.1 MHz. La antena desarrollada cuenta con la característica especial de que solo capta la componente

magnética de las ondas emitidas, con lo cual se elimina la componente del ruido eléctrico de radiofuentes locales como las emisoras de radio o cualquier otro ruido eléctrico que pueda llegar a esta. La antena se instaló en la terraza del OAUTP, con una orientación este-oeste, paralelo al tránsito del planeta Júpiter y del Sol en la bóveda celeste, ocupando un área vertical de tan solo $2m^2$, en contraste con los $21m^2$ necesarios para instalar una antena dipolo. La antena construida posee un ancho de banda de 60 kHz, siendo esta una desventaja con respecto a las antenas dipolo, pues el ancho de banda reducido no permite registrar todas las emisiones de radiofrecuencia que produce la actividad joviana o solar, aunque si las más significativas, como es el caso de los eventos presentados en el capítulo de resultados.

Gracias a la implementación del software Radio SkyPipe fue posible adelantar el registro continuo de las señales procedentes de Júpiter y del Sol durante un período de 10 meses. Posteriormente, este mismo software permitió la visualización y análisis de cada uno de esos registros, pues cada señal se tuvo que ver parte por parte y a la vez compararla con la base de datos respectiva en el caso del Sol o correlacionarla con un intervalo temporal de probabilidad de ocurrencia de evento para el caso de Júpiter. De esa manera, se pudo determinar si en el registro existía o no una detección joviana o solar y extraer la fecha, la hora, la duración y la intensidad de dicho evento.

Con respecto al análisis ejecutado para los registros se concluye que los programas fueron los apropiados para la validación, identificación y registro de las formas de onda correspondientes a las radio detecciones jovianas y solares. Se logró ajustar el software Radio SkyPipe de tal forma que las unidades de intensidad correspondieran a una unidad física relacionada con la temperatura de la antena y no a cuentas adimensionales, lo que permite comparar los registros medidos en el OAUTP con otros observatorios en radio que operen en esta misma frecuencia de 20.1 MHz. Se empleó el software Radio Jupiter Pro para programar jornadas de observación joviana y validar cada uno de los registros medidos con la comparación de probabilidad de ocurrencia en función del CML y de la Fase de Io, para poder atribuir una radiofuente particular a cada una de las detecciones.

Finalmente, es necesario mencionar que en todos los registros medidos hubo presencia de interferencia instantánea, la cual se aprecia en las señales como picos abruptos distribuidos aleatoriamente a lo largo de todo el intervalo temporal y que se atribuyen a la actividad humana diurna y al ruido electromagnético generado por sistemas comunicación inalámbrica, puesto que era claro al observar las señales, que la cantidad de dichos picos aumentaba entre

las 7:00am y las 7:00pm (hora local), intervalo de tiempo que corresponde al horario de visibilidad solar y de mayor actividad humana en el campus de la universidad. Con esto último se concluye que a pesar de que el radiotelescopio posee varias etapas y dispositivos para el filtrado de datos indeseados, esto no lo exime de que dentro del ancho de banda de operación del sistema se presente ruido y quede registrado en la señal.

Para cerrar, cabe resaltar que otro aporte importante del trabajo es que el Observatorio Astronómico de la Universidad Tecnológica de Pereira ahora cuenta con un registro de datos para que en trabajos posteriores se realicen estudios acerca de las causas, periodicidad o predicción de los fenómenos solares y jovianos.

Bibliografía

- [1] M. Born and R. Fürth. Radio frequency energy from the sun. *Nature Publishing Group*, 157(1):157–158, 1946.
- [2] M. E. Tiuri. Radio astronomy receivers. *Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE*, pages 930–938, 1964.
- [3] K.M. Abood and N.M. Ebadi. Determination sky radio emission background using radio jove telescope. *J. Of College of Education for Women*, 24(2):562–571, 2013.
- [4] T. Discepola, G. Haislip, S. Elnahal, M. Fitzsimmons, M. Kang, J. Krishnan, S. Paliwal, H. Paltiel, D. Park, and M Senese. Songs of jupiter: Detecting radio waves from space. I(2):1–16, 2002.
- [5] T. Hidayat, M. Irfan, A. Dermawan, B. Suksmono, P. Mahasena, and D. Herdiwijaya. Development of radio astronomy at the bosscha observatory. *Proceedings of the Conference of the Indonesia Astronomy and Astrophysics*, pages 143–148, 2009.
- [6] T. Hidayat, S. León-Tanne, A. B. Suksmono, P. Mahasena, M. Irfan, and Indrawanto. Recent development of radio astronomy at the bosscha observatory. *NARIT Conference Series*, pages 534–537, 2013.
- [7] I. Myserlis, J.H. Seiradakis., U. Klein, and M Dogramatzidis. Solar observations with a low frequency radio telescope. *10th Hel.A.S Conference Ioannina*, pages 1–4, 2011.
- [8] M. L. West, N. Frissel, and M. Papalos. Relationship between the radio bursts from the and ionospheric propagation. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 38:918, 2006.
- [9] J. J Perengüez and A. Quijano. Estudio teórico y experimental de las radioemisiones producidas por el planeta júpiter. *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA*, 34(2):616–617, 2002.

- [10] K. M. Abood and N. M. Ebadi. Study of sunspot effect on radio jove telescope observation. *Iraqi Journal of Science*, 55(1):258–267, 2014.
- [11] D. Fisher. *Basics of Radio Astronomy*. 1998.
- [12] V. Bianchi. Radioastronomía: Una mirada más amplia. *RELEA*, 1:61–76, 2004.
- [13] D. Basu and J. L. Pires. Relation between jupiter’s decametric radio emission and its great red spot. *Astrophysical Letters*, 12:99–102, 1972.
- [14] D. Basu and C. J. Banos. Relation between jupiter’s decametric radio emission and its activity in the equatorial zone. *Astrophysical Letters*, 16:97–100, 1975.
- [15] K. M. Abood and R. H. Ibrahim. Relationship between cml and io’s phase according to jupiter’s actual radio storms observations. *IJP*, 11(20):100–109, 2013.
- [16] A. B. Bhattacharya and S. Mondal. Probability of reception of jovian bursts as derived from io-phase and the location of central meridian longitude. *IJECT*, 4:104–106, 2013.
- [17] B. Ismail and M. K. Hisham. Listening to jupiter’s signal using radio telescope recorder. *ICCDA*, 1:278–282, 2010.
- [18] A. B. Bhattacharya et al. Detection of jovian radio bursts at high altitudes. *IJEST*, 4(6):3029–3038, 2012.
- [19] R. S. French. An urban radio telescope for jovian and solar emissions at 20.1 mhz, 2009.
- [20] S. Joardar and A. B. Bhattacharya. Design and analysis of a low-frequency radio telescope for jovian radio emission. *Electromagnetics Research*, 72:127–143, 2007.
- [21] J. L. Lombardero. Radiotelescopio loop, 2010.
- [22] W. Kwon et al. A magnetic resonant loop antenna to enhance the operating distance of 13.56 mhz rfid systems. *ISOCC IEEE*, pages 13–14, 2013.
- [23] F. El Hatmi et al. Magnetic loop antenna for wireless capsule endoscopy inside the human body operating at 315 mhz: Near field behavior. *MMS IEEE*, pages 81–87, 2011.
- [24] H. Martinez and M. R. Ghezzi. La antenna cuadro o magnetic loop, 2014.
- [25] J. D. Kraus. *Antennas*. McGraw Hills, 1997.

- [26] N. K. Nikolova. loop antennas, 2014.
- [27] Sasao T. and Fletcher A. B. Introduction to vlbi systems: Basic knowledge of radio astronomy. pages 2–4, 2006.
- [28] J.L. Jenkins. *The Sun and how to Observe it*. Springer, 2009.
- [29] Rodríguez I. T., García E., and Valiente J. Análisis de las eyecciones de masa coronal y del viento solar que presentan eventos protónicos asociados. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 6:16–24, 2005.
- [30] Marcote M. B. Efecto del sol sobre la atmosfera terrestre. *Física de la atmosfera*, pages 9–12, 2011.
- [31] B.F. Burke and K.L. Franklin. Observations of a variable radio source associated with the planet jupiter. *Journal of Geophysical Research*, 60(2):213–217, 1955.
- [32] M. Wilkinson and J. Kennewel. Detecting jupiter’s radio emissions. *Journal Southern Sky*, pages 1–10, 1994.
- [33] A. Lecacheux, M.Y. Boudjada, H.O. Rucker, J.L. Bougeret, R. Manning, and M.L. Kaiser. Jovian decameter emissions observed by the wind/waves radioastronomy experiment. *Astronomy and Astrophysics*, 329:776–784, 1998.
- [34] J. Queinnec and P. Zarka. Io-controlled decameter arcs and io-jupiter interaction. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 103(A11):26649–26666, 1998.
- [35] K. Imai, L. Wang, and T.D. Carr. Origin of jupiter’s decametric modulation lanes. *Austrian Academy of Sciences Press*, pages 69–90, 1992.
- [36] A. Alberdi and S.L. De La calle. Júpiter el gigante magnético. *Un viaje al Cosmos*, pages 60–70, 2007.
- [37] M. Alonso, E.J. Finn, and R.F. Stetson. *Fundamental university physics*, volume III. American Association of Physics Teachers, 1969.
- [38] J.L. Lombardero. Radiotelescopio loop. *CPAN-Ingenio 2010*, pages 1–16, 2010.
- [39] G.L. Verschuur and K.I. Kellermann. *Galactic and extragalactic radio astronomy*. Springer Verlag, 1988.

- [40] P. Salas and M.A. Solis. Estrellas de neutrones. *REVISTA MEXICANA DE FISICA*, 52(1):37, 2006.
- [41] S. Yates. Small transmitting loop antennas: Magnetic loop antennas, 2013.
- [42] A. Voors. 4nec2 based antenna modeler and optimizer, 2005.
- [43] Richard S Flagg. Jove rj1. 1 receiver kit assembly manual. *NASA Radio JOVE Project*, 2000.

Apéndice A

Apéndice

A.1 Intervalos angulares para las radio fuentes A, B, C, Io-A, Io-B e Io-C

Fuente	CML(grados)	αIo (grados)	Característica
A	200-290	No aplica	Ráfagas L y S
B	90-200	No aplica	Ráfagas L y S
C	290-10	No aplica	Ráfagas L y S
Io-A	200-290	195-265	Ráfagas S y L con polarización RH
Io-B	90-200	75-105	Ráfagas L con polarización RH
Io-C	290-10	225-250	Ráfagas S con polarización LH

Tabla A.1: Intervalos angulares para las radio fuentes A, B, C, Io-A, Io-B e Io-C ¹.

¹Fuente: University of Florida Radio Observatory Online (UFRO) <http://ufro1.astro.ufl.edu>

A.2 Clasificación de las explosiones de radio solares

Tipo	Característica	Duración	Rango	Fenómeno
I	Explosiones cortas con ancho de banda de estrecho que se producen en grandes cantidades.	Explosión individual: 1 segundo, Tormenta: Horas-días	8-200 MHz	Regiones activas, erupciones prominentes y llamaradas
II	Ráfagas con frecuencia de deriva lenta acompañadas de un segundo armónico.	3-30 minutos	20-150 MHz	Llamaradas, emisión de protones y ondas de choque magnetohidrodinámicas
III	Ráfagas con frecuencia de deriva rápida que se generan de manera individual, en grupos o como tormentas.	Explosión individual: 1-3 segundos, Grupo: 1-5 minutos Tormenta: Minutos-horas	10 KHz-1 GHz	Regiones activas y llamaradas
IV	Estacionaria: Estructura fina con banda ancha continua.	Horas-días	20 MHz-2 GHz	Llamaradas y emisión de protones
IVa	No estacionaria: Estructura suave de banda ancha continua, frecuencia de deriva lenta.	30 minutos-2 horas	20-400 MHz	Ondas de choque magnetohidrodinámicas y erupciones prominentes.
IVb	Continua: Estructura suave de banda ancha continua.	3-45 minutos	25-200 MHz	Llamaradas y emisión de protones
V	Se genera siempre luego de una ráfaga tipo III.	1-3 minutos	10-200 MHz	Regiones activas y llamaradas

Tabla A.2: Clasificación de las explosiones de radio solares².

En general, en las ráfagas que poseen frecuencia de deriva, el cambio es de altas a bajas frecuencias y el rango de frecuencia no hace referencia al ancho de banda de la emisión, sino que es el rango típico en el que se genera la actividad. Por otro lado, los subtipos IVa y IVb no son reconocidos oficialmente como un tipo de llamarada solar, sin embargo actualmente son candidatos a serlo.

²Fuente: Australian Government Bureau of Meteorology: Space Weather Services
http://www.ips.gov.au/World_Data_Centre/1/9/5